

Come vincere la guerra alla desertificazione

● Aprile 2017

€ 4,50

Le Scienze

www.lescienze.it

edizione italiana di Scientific American

Espansione senza inflazione



**I dati raccolti
dal satellite
Planck rimettono
in discussione
la più diffusa teoria
sulle origini del cosmo**

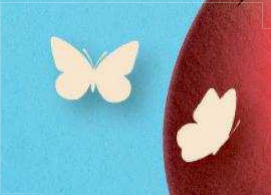
Evoluzione

Perché chi fa molta attività
brucia tante calorie quanto
chi ha una vita sedentaria


Viaggi spaziali

I danni cerebrali causati dai raggi
cosmici potrebbero impedirci
di esplorare altri pianeti


IN *Pink Lady*® SIAMO TUTTI IMPEGNATI!




In un percorso d'eccellenza,
in cui ogni fase (taglio, sfogliatura,
diradamento...) realizzata a mano
ottimizza il soleggiamento,
per frutti pieni di sapore.



Nello sviluppo di una produzione responsabile (mantenimento della biodiversità, preservazione delle risorse naturali...).



A rispettare un periodo ideale di raccolta, determinato dal livello del colore, dello zucchero e della compattezza, per raccogliere le mele a perfetta maturazione.



A far controllare la qualità delle nostre mele, le nostre buone pratiche agricole, la conservazione e gli imballaggi da organismi indipendenti.



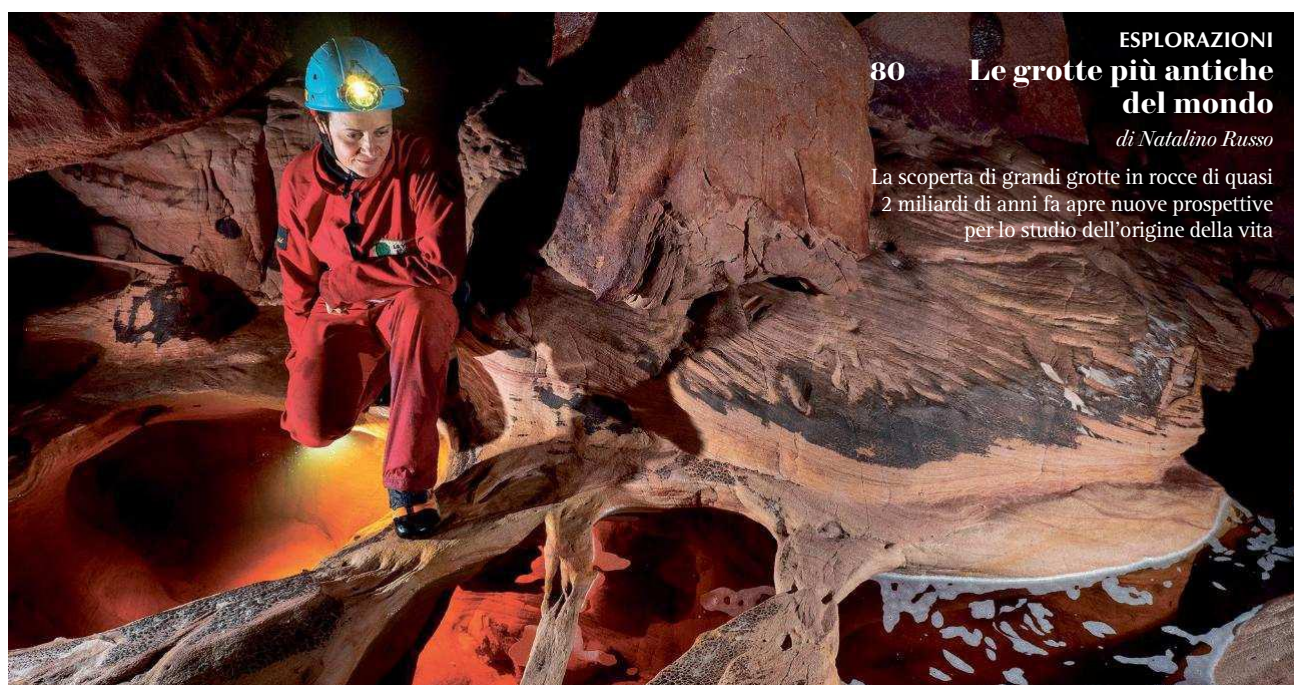
Per maggiori informazioni visitate il sito:
www.mela-pinklady.com

La mela che coltiva i suoi valori



Una delle teorie più accreditate sull'evoluzione del cosmo afferma che nei suoi primi istanti di vita l'universo si espanse in modo esponenziale. Ma recenti dati osservativi obbligano a riconsiderare questo scenario. (Fotografia di The Voorhes)

aprile 2017 numero 584



ESPLORAZIONI

80 Le grotte più antiche del mondo

di Natalino Russo

La scoperta di grandi grotte in rocce di quasi 2 miliardi di anni fa apre nuove prospettive per lo studio dell'origine della vita

COSMOLOGIA

28 L'universo fa boom

di Anna Ijjas, Paul J. Steinhardt e Abraham Loeb

Le più recenti misurazioni astrofisiche, insieme ad alcuni problemi teorici, mettono in dubbio l'amata teoria dell'inflazione sul cosmo delle origini e suggeriscono la necessità di idee nuove

AMBIENTE

36 Guerra ai deserti

di Alfonso Lucifredi

La lotta alla desertificazione, una minaccia per oltre un miliardo di persone, può contare su tecniche agricole e piante adatte ad ambienti aridi che possono anche sostenere le economie locali

METROLOGIA

42 Un problema di massa

di Tim Folgers

Il lungo sforzo per liberarsi del decadente manufatto ottocentesco grazie a cui si definisce il chilogrammo è prossimo alla conclusione

SALUTE

50 Medicina alla cieca

di Mark Peplow

Le scansioni diagnostiche di milioni di pazienti dipendono da un raro isotopo radioattivo di un unico elemento chimico. Ma i vecchi reattori nucleari che lo producono stanno chiudendo i battenti

EVOLUZIONE

54 Il paradosso dell'attività fisica

di Herman Pontzer

Gli studi sul consumo energetico del motore umano aiutano a spiegare perché l'attività fisica è poco efficace per tenere sotto controllo il peso corporeo e come la nostra specie abbia acquisito alcuni dei suoi più specifici tratti distintivi

LINGUISTICA

60 La parola fischiata

di Julien Meyer

Prima dello smartphone e perfino del codice Morse, alcune popolazioni rurali «parlavano» a distanza fischiando, un mezzo di comunicazione che ancora oggi affascina i linguisti

NEUROSCIENZE

68 Lo spazio può attendere

di Charles L. Limoli

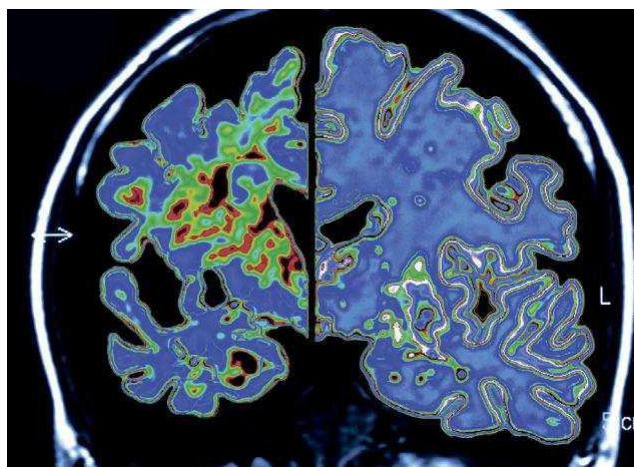
Studi recenti dimostrano che i danni prodotti dalle radiazioni cosmiche sul cervello degli astronauti potrebbero essere più gravi di quanto pensassimo. Vivere e viaggiare nello spazio sarà mai possibile?

BIOLOGIA

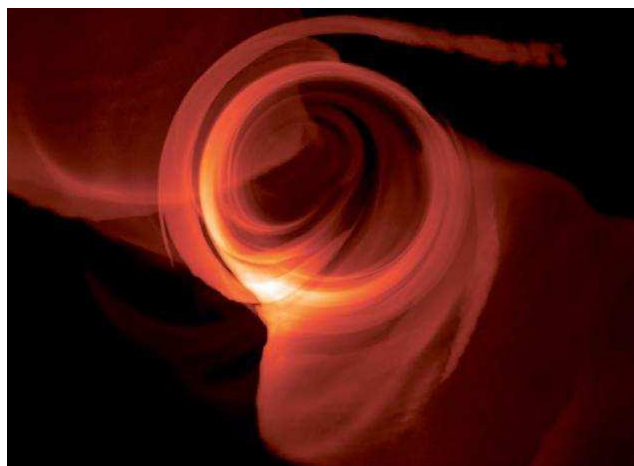
74 Le linee aeree dei microbi

di David Schmale e Shane Ross

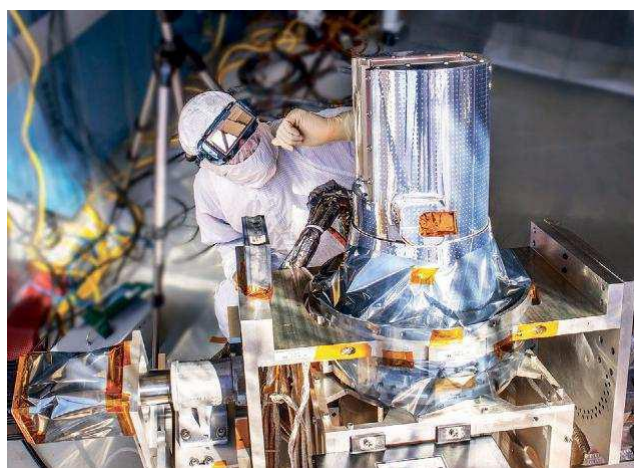
Droni volanti e teoria del caos servono ai ricercatori per studiare i tanti modi in cui i microrganismi si diffondono e fanno danni nel mondo



15



17



89

Rubriche

7 Editoriale

di Marco Cattaneo

8 Anteprima

10 Intervista

Scienza e arte senza censure di Matteo Serra

12 Made in Italy

La via passiva all'aria pulita di Letizia Gabaglio

14 Scienza e filosofia

Il pendolo delle specie di Telmo Pievani

15 Appunti di laboratorio

Una riparazione imperfetta di Edoardo Boncinelli

16 Il matematico impertinente

Analogie matematiche di Piergiorgio Odifreddi

17 La finestra di Keplero

Ritratto di un buco nero di Amedeo Balbi

18 Homo sapiens

Il mosaico dei denisoviani di Giorgio Manzi

88 Coordinate

Le migrazioni degli insetti di Mark Fischetti

89 Povera scienza

L'ozono e il presidente di Paolo Attivissimo

90 La ceretta di Occam

Un allarme prematuro di Beatrice Mautino

91 Pentole & provette

La tripletta del caramello di Dario Bressanini

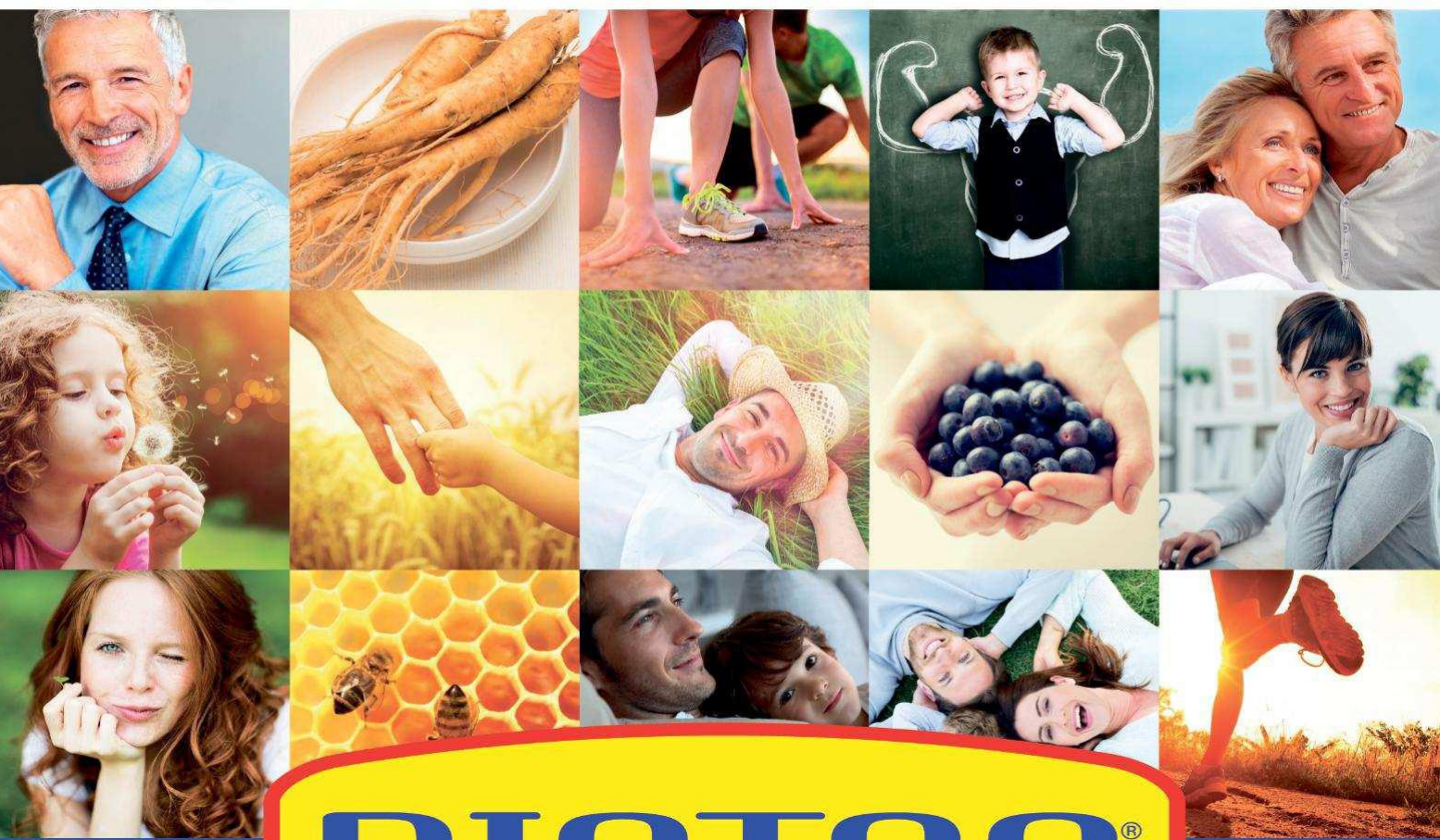
92 Rudi matematici

Quasi come al 221b di Baker Street
di Rodolfo Clerico, Piero Fabbri e Francesca Ortenzio

94 Libri & tempo libero

SCIENZA NEWS

- | | | |
|---|---|---|
| 19 Il motore climatico delle migrazioni | 21 La resilienza della comunità di Paris | 24 Come una pianta diventa carnivora |
| 20 Un big bang di onde gravitazionali | 22 Quei geni dei Neanderthal | 25 La proteina che accomuna sesso e virus |
| 20 Composti organici su Cerere | 22 L'unicità genetica dei sardi | 25 Un equilibrato ricambio cellulare |
| 21 De-estinzione oppure no? | 24 L'antica impronta umana sull'Amazzonia | 26 Brevvissime |



BIOTON®

ENERGIA DALLA NATURA PER IL CORPO E PER LA MENTE



In particolari **periodi dell'anno**, in concomitanza con il mutare delle stagioni (**inverno-primavera, estate-autunno**), ma anche in coincidenza di periodi di **stress** e di maggiore **affaticamento**, si sente l'esigenza di **ENERGIA NUOVA**. I prodotti della **LINEA BIOTON**, miscele studiate di **sostanze naturali**, arricchiscono sinergicamente l'alimentazione quotidiana, fornendo al corpo e alla mente le **energie perdute**.

Ginseng, Eleuterococco, Ginkgo Biloba, Pappa Reale e Mirtillo sono sostanze ricche di principi attivi naturali che esercitano un'**azione** positiva **tonica e ricostituente** sull'organismo di **adulti e bambini**.

Con BIOTON puoi incrementare **vitalità, benessere, resistenza fisica e mentale**.

SELLA

Scopri la Linea Bioton su www.sellafarmaceutici.it
Chiedi un consiglio al tuo farmacista.



codice
EDIZIONI

RENATO BRUNI
**LE PIANTE SON
BRUTTE BESTIE**

pp. 224 | euro 18,00

Volume illustrato a colori

DAVVERO LE PIANTE POSSONO CAMBIARE SESSO?
PERCHÉ È IMPOSSIBILE STACCARE L'EDERA DAI MURI?
PERSE TRA SMOG E PALAZZI, COME FANNO LE API
A TROVARE I FIORI SUI NOSTRI BALCONI?
SI PUÒ DAVVERO CONCIMARE CON LA PIPÌ?

Le storie meno battute e le spiegazioni meno ovvie di un anno di giardinaggio spuntano tra gli orti, i giardini e i balconi fioriti, coniugando il pollice verde e la scienza.

DELLO STESSO AUTORE

ERBA VOLANT
IMPARARE L'INNOVAZIONE DALLE PIANTE

pp. 240 | euro 15,00



info@codiceedizioni.it
codiceedizioni.it

 facebook.com/codiceedizioni
 twitter.com/codiceedizioni
 pinterest.com/codiceedizioni

codice
EDIZIONI



di Marco Cattaneo

La misura del mondo

Verso la ridefinizione del chilogrammo

Le unità di misura sono importanti. Ne sanno qualcosa gli scienziati che nel 1998 lanciarono il Mars Climate Orbiter. Giunta nelle vicinanze del Pianeta Rosso, il 23 settembre 1999 la sonda eseguì una breve accensione del motore principale per l'inserimento in orbita. Ma anziché collocarsi alla quota prevista di 140-150 chilometri sulla superficie arrivò ad appena 57 chilometri e venne distrutta dagli stress causati dall'attrito con l'atmosfera di Marte.

Alla commissione incaricata di indagare sulle cause del disastro bastarono poche settimane per accertare che la distruzione della sonda era dovuta a un errore umano. Un errore dei più banali. Il software di terra aveva prodotto, e comunicato, risultati per la correzione della traiettoria basati sul sistema imperiale britannico, anziché sul sistema metrico decimale. Mandando in fumo 328 milioni di dollari.

Quella del sistema metrico è una storia avvincente. Ufficialmente, se ne potrebbe fissare la data di nascita al 24 aprile 1799, quando la Commission des poids et des mesures francese decretò che il «metro legale» era costituito da un regolo di platino costruito in due esemplari e corrispondente – più o meno – a un decimo di milionesimo di un quarto del meridiano terrestre.

L'idea di un'unità di misura comune e universale si era fatta strada con maggiore insistenza a partire dal 1788, quando Luigi XVI aveva istituito i *Cahiers de doléances*, che raccoglievano suppliche e reclami di una popolazione fiaccata da carestie e

iniquità. Molti di quei reclami riguardavano l'arbitrarietà con cui nobili e prelati stabilivano le unità di misura. Che differivano da una provincia all'altra, da un borgo all'altro, persino nella stessa città. All'epoca, in Francia, si contavano più di 200 unità chiamate libbra, e decine di aune, di leghe, di moggì, come racconta Denis Guedj in *Il metro del mondo*.

Fu così che all'inizio del 1792 due astronomi, Jean-Baptiste Delambre e Pierre Méchain, furono incaricati di misurare l'arco di meridiano compreso tra Dunkerque e Barcellona. In una Francia sconvolta dalla rivoluzione, tra mille disavventure, i due avrebbero portato a termine l'incarico ritrovandosi a Carcassonne sette anni dopo, dove il 28 novembre 1798 si riunì la Commissione internazionale incaricata di verificarne i calcoli.

Nei due secoli che ci separano da quell'impresa, il metro e il secondo sono stati ridefiniti in termini di costanti fisiche universali. Manca il chilogrammo, che è ancora basato su Le grand K, un cilindro di platino e iridio custodito in una camera di sicurezza a Parigi. Ma il confronto eseguito nel 1992 con le sue copie ufficiali, i *témoins*, ha rivelato che probabilmente il prototipo ufficiale sta perdendo massa. Poca, ma quanto basta per correre ai ripari.

Così, se tutto andrà secondo i programmi, nel 2018 il chilogrammo sarà ridefinito in base alla costante di Planck, come spiega Tim Folgers a pagina 42. Perché le unità di misura sono importanti. E la loro definizione è un affascinante capitolo della storia della scienza e della società.



Comitato scientifico

Leslie C. Aiello

presidente, Wenner-Gren Foundation for Anthropological Research

Roberto Battiston

professore ordinario di fisica sperimentale, Università di Trento

Roger Bingham

docente, Center for Brain and Cognition, Università della California a San Diego

Edoardo Boncinelli

docente, Università Vita-Salute San Raffaele, Milano

Arthur Caplan

docente di bioetica, Università della Pennsylvania

Vinton Cerf

Chief Internet Evangelist, Google

George M. Church

direttore, Center for Computational Genetics, Harvard Medical School

Rita Colwell

docente, Università del Maryland a College Park e Johns Hopkins Bloomberg School of Public Health

Richard Dawkins

fondatore e presidente, Richard Dawkins Foundation

Drew Endy

docente di bioingegneria, Stanford University

Ed Felten

direttore, Center for Information Technology Policy, Princeton University

Kaigham J. Gabriel

presidente e CEO, Charles Stark Draper Laboratory

Harold Garner

direttore, divisioni sistemi e informatica medici, docente, Virginia Bioinformatics Institute, Virginia Tech

Michael S. Gazzaniga

direttore, Sage Center for the Study of Mind, Università della California a Santa Barbara

David Gross

docente di fisica teorica, Università della California a Santa Barbara (premio Nobel per la fisica 2004)

Danny Hillis

co-presidente, Applied Minds, LLC

Daniel M. Kammen

direttore, Renewable and Appropriate Energy Laboratory, Università della California a Berkeley

Vinod Khosla

Partner, Khosla Ventures

Christof Koch

docente di biologia cognitiva e comportamentale, California Institute of Technology

Lawrence M. Krauss

direttore, Origins Initiative, Arizona State University

Morten L. Kringelbach

direttore, Hedonia: TrygFonden Research Group, Università di Oxford e Università di Aarhus

Steven Kyle

docente di economia applicata e management, Cornell University

Robert S. Langer

docente, Massachusetts Institute of Technology

Lawrence Lessig

docente, Harvard Law School

John P. Moore

docente di microbiologia e immunologia, Weill Medical College, Cornell University

M. Granger Morgan

docente, Carnegie Mellon University

Miguel Nicolelis

condirettore, Center for Neuroengineering, Duke University

Martin Nowak

direttore, Program for Evolutionary Dynamics, Harvard University

Robert Palazzo

docente di biologia, Rensselaer Polytechnic Institute

Telmo Pievani

professore ordinario filosofia delle scienze biologiche, Università degli Studi di Padova

Carolyn Porco

leader, Cassini Imaging Science Team, e direttore, CICLOPS, Space Science Institute

Vilayanur S. Ramachandran

direttore, Center for Brain and Cognition, Università della California a San Diego

Lisa Randall

docente di fisica, Harvard University

Carlo Alberto Redi

docente di zoologia, Università di Pavia

Martin Rees

docente di cosmologia e astrofisica, Università di Cambridge

John Reganold

docente di scienza del suolo, Washington State University

Jeffrey D. Sachs

direttore, The Earth Institute, Columbia University

Eugenie C. Scott

Founding Executive Director, National Center for Science Education

Terry Sejnowski

docente e direttore del Laboratorio di neurobiologia computazionale, Salk Institute for Biological Studies

Michael Shermer

editore, rivista «Skeptic»

Michael Snyder

docente di genetica, Stanford University School of Medicine

Giorgio Vallortigara

docente di neuroscienze, direttore associato, Centre for Mind/Brain Sciences, Università di Trento

Lene Vestergaard Hau

docente di fisica e fisica applicata, Harvard University

Michael E. Webber

direttore associato, Center for International Energy & Environmental Policy, Università del Texas ad Austin

Steven Weinberg

direttore, gruppo di ricerca teorica, Dipartimento di fisica, University del Texas ad Austin (premio Nobel per la fisica 1979)

George M. Whitesides

docente di chimica e biochimica, Harvard University

Nathan Wolfe

direttore, Global Viral Forecasting Initiative

Anton Zeilinger

docente di ottica quantistica, Università di Vienna

Jonathan Zittrain

docente di legge e computer science, Harvard University

Un mondo di matematici

A maggio a richiesta con la rivista *Storie che contano*, un libro dei Rudi Matematici

La matematica può essere un ottimo espediente narrativo. Lo sanno bene i lettori di «Le Scienze», soprattutto quelli affezionati alla rubrica dei Rudi Matematici, sapienti narratori, abili costruttori di racconti. Così sapienti e abili da meritarsi un libro, *Storie che contano*, allegato a richiesta con il numero di maggio della rivista e in vendita nelle librerie per Codice Edizioni. Dimenticate però i personaggi della rubrica ospitata su «Le Scienze». Rodolfo Clerico, Piero Fabbri, Francesca Ortenzio nel loro libro architettano una serie di racconti che hanno per protagonisti alcuni grandi della storia della matematica, «surrettiziamente messi sulla scena come propositori e solutori di alcuni problemi di matematica ricreativa».

C'è qualcosa in più, però. Gli autori non presentano solo problemi di matematica, ma raccontano anche qualcosa di quelle persone che la matematica hanno creato. Negli otto capitoli che compongono il libro, i lettori potranno immergersi in altrettanti ritratti di matematici di epoche diverse e, se vorranno, cimentarsi nei problemi che ricalcano le conoscenze di ciascun protagonista, verificando le proprie soluzioni con quelle dei Rudi.

Il primo è il persiano Omar Khayyām. Vissuto tra XI e XII secolo, Khayyām è conosciuto soprattutto per la sua poesia, ma è stato anche un grande matematico: ha scritto soprattutto di algebra e astronomia. Inoltre si è impegnato in una riforma del calendario che, sebbene non messa in atto nell'Islam del suo secolo, aveva una precisione confrontabile con quella attuata da papa Gregorio XIII in Occidente 500 anni dopo, e che ancora oggi regola i nostri calendari, reali e virtuali. Il secondo personaggio del libro è Leonardo da Vinci, e il racconto si basa su un incontro tra Leonardo e Albrecht Dürer. Se la riunione

tra i due massimi esponenti del Rinascimento italiano e tedesco sia realmente avvenuta, è argomento di dibattito tra gli studiosi, e finora nessuno ha trovato una risposta definitiva. In ogni caso, raccontano i Rudi, se in effetti c'è stato un incontro tra Leonardo e Dürer, è probabile che sia avvenuto in Italia.

La storia del terzo capitolo ha come protagonista Isaac Newton, uno dei più grandi matematici della storia e allo stesso tempo uno dei più grandi fisici. Con ogni probabilità, scrivono gli autori, l'unica persona che potrebbe trovarsi contemporaneamente sul podio di questi due ambiti della scienza. Nel quarto troviamo di nuovo

un italiano, Luigi Federico Menabrea. Il racconto si snoda attorno alla partecipazione di questo giovane capitano del Genio militare a un congresso dei filosofi naturali, noto anche come la «Riunione degli Scienziati» tenutosi a Torino nel settembre 1840.

Spostandosi un po' più in avanti nello spazio e nel tempo, il capitolo successivo racconta una storia della matematica tedesca Emmy Nöther, che tra gli anni venti e trenta del XX secolo ha di fatto fondato l'algebra moderna. Nel sesto capitolo si racconta quella che è stata la più duratura e straordinaria collaborazione della storia della matematica,

tra Godfrey Harold Hardy e John Edensor Littlewood, e di come i due britannici hanno scoperto il talento di uno sconosciuto, all'epoca, matematico indiano: Srinivasa Ramanujan. Il genio assoluto di John von Neumann, il padre dell'informatica, è al centro del settimo capitolo. Il libro si chiude con l'ungherese Paul Erdős, uno dei personaggi più prolifici e curiosi della matematica del XX secolo. Che amiate le storie o il mondo dei numeri, quindi, questo libro fa per voi. Se poi avete una doppia passione, allora siete due volte fortunati.



RISERVATO AGLI ABBONATI

Gli abbonati possono acquistare i volumi di **La Biblioteca delle Scienze** al prezzo di € 8,40 incluso il prezzo di spedizione e telefonando al numero 199.78.72.78 (0864.256266 chi chiama da telefoni non abilitati).

La stessa offerta è valida per richiedere i volumi della collana **I manga delle scienze** al prezzo di € 9,90 incluse le spese di spedizione. Il costo massimo della telefonata da rete fissa è di 14,37 cent di euro al minuto più 6,24 cent di

euro di scatto alla risposta (IVA inclusa). Per chiamate da rete mobile il costo massimo della chiamata è di 48,4 cent di euro al minuto più 15,62 cent di euro di scatto alla risposta (IVA inclusa).

Un racconto di numeri e forme

Dal 30 marzo *la Matematica*, una collana settimanale curata da Piergiorgio Odifreddi



Tutto è numero, diceva Pitagora agli alunni della sua scuola filosofica fondata nel VI secolo a.C. nella Crotona della Magna Grecia. In effetti da millenni la matematica accompagna piccole e grandi imprese umane: da quelle più intellettuali, per esempio la costruzione di teorie scientifiche sulla natura intima della realtà, a quelle di carattere applicativo, per esempio le tecnologie informatiche di uso quotidiano. Per ripercorrere alcuni dei passaggi più importanti dello sviluppo di questa disciplina, «Le Scienze» e «la Repubblica» pubblicano *la Matematica*, una collana con cadenza settimanale di dieci DVD curati da Piergiorgio Odifreddi. La prima uscita è giovedì 30 marzo, ed è possibile acquistare il DVD a 6,90 euro oltre al prezzo di copertina di «Le Scienze» o «la Repubblica».

Il racconto parte dai fondamenti della matematica antica: i numeri nel primo DVD, e le forme geometriche nel secondo. Entrambi nati da esigenze pratiche legate a commercio e agricoltura, numeri e forme sono entrati poi a far parte delle specula-

zioni filosofiche e religiose. Seguendo questo filo rosso, i due successivi DVD si concentrano sui grandi matematici greci, da Pitagora ed Euclide ad Archimede, passando dal teorema sui quadrati costruiti sui lati di un triangolo rettangolo, alle prime cifre dello sviluppo del pi greco.

La matematica però non è stata un'esclusiva del mondo occidentale. Con la fine dell'ellenismo, all'orizzonte di questa disciplina si sono affacciati nuovi popoli e culture, come raccontano il quinto e il sesto DVD centrati sulla scoperta della prospettiva in Italia e sullo sviluppo degli arabeschi nella Spagna islamica. Ma è stato con l'arrivo della rivoluzione del metodo scientifico che la matematica ha fatto un salto di qualità, diventando il linguaggio con cui la scienza descrive i suoi risultati concreti, come raccontano il settimo e l'ottavo DVD. La nona uscita affronta il big bang della matematica del Novecento, in particolare la concezione della quarta dimensione. Il racconto della collana si chiude con uno sguardo matematico alla storia dell'arte, a sottolineare che arte e matematica sono due facce della stessa medaglia.

PIANO DELL'OPERA

30 MARZO 2017

I numeri e il calcolo

La nascita del pensiero numerico

6 APRILE

La geometria

La misura dello spazio e delle forme

13 APRILE

Pitagora ed Euclide

L'affermazione del pensiero razionale

20 APRILE

Archimede e la sfera

La matematica diventa scienza

27 APRILE

Brunelleschi e la prospettiva

La rappresentazione del mondo

4 MAGGIO

Le conquiste degli arabi

Le figure astratte, la simmetria e l'algebra

11 MAGGIO

La rivoluzione scientifica

Newton e il calcolo infinitesimale

18 MAGGIO

Geometrie non euclidee

Dal piano di Euclide all'universo di Einstein

25 MAGGIO

Oltre la terza dimensione

Descrivere nuovi mondi

1 GIUGNO

La matematica degli artisti

Le regole della rappresentazione visiva

Scienza e arte senza censure

Andrea Bandelli è il direttore esecutivo di Science Gallery International, una rete di gallerie che coniugano scienza e arte, con contenuti spesso forti ed espliciti

Nel 2008, un parcheggio in un angolo dimenticato del Trinity College di Dublino fu trasformato in uno spazio destinato a sperimentare un'idea nuova di *science center*, basata su pochi elementi fondamentali: mostre temporanee, ingresso sempre gratuito, forte connubio tra scienza e arte e *target* di riferimento costituito da giovani adulti. Nacque così, un po' in sordina, Science Gallery, un progetto che a distanza di quasi dieci anni rappresenta oggi un punto di riferimento ormai ben riconosciuto nel settore. Dopo aver allargato i propri confini a Londra, Melbourne e Bangalore, Science Gallery approderà presto anche in Italia, all'Università Ca' Foscari di Venezia.

Dal 2016, a dirigere l'intera rete di gallerie è il triestino (ma olandese d'adozione) Andrea Bandelli, che dopo gli studi in Italia ha lavorato in alcuni tra i più importanti *science center* del mondo, sperimentando nuove forme di comunicazione della scienza.

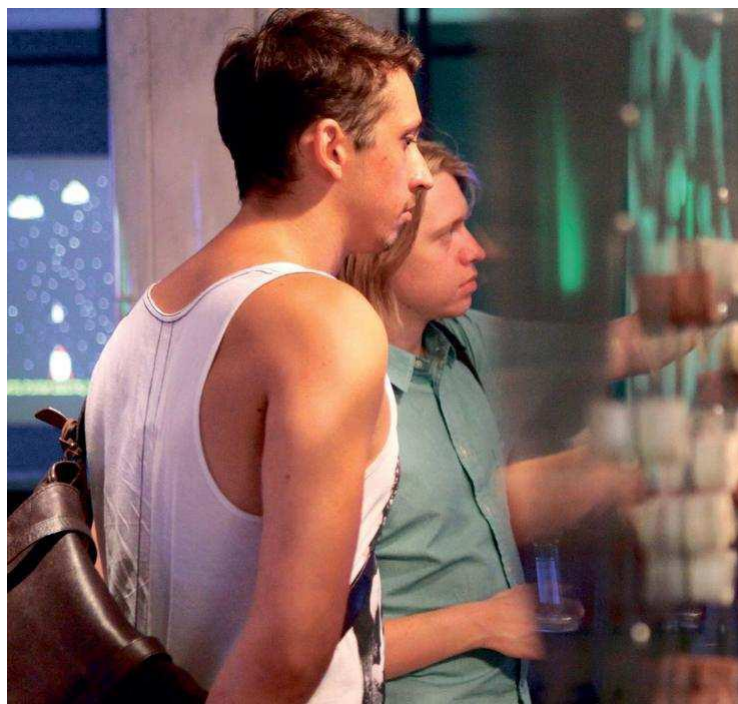
Su quali valori si basa l'esperienza di Science Gallery?

I nostri valori fondanti sono tre: connettere, partecipare, sorprendere. Connettere, perché tutto quello che si fa a Science Gallery è pensato per mettere in contatto le persone, favorendo soprattutto il dialogo diretto dei visitatori con i ricercatori e gli artisti, che sono spesso presenti durante gli eventi. Partecipare, perché consideriamo fondamentale la partecipazione diretta del pubblico, sia emotiva sia fisica: in molte installazioni offriamo ai visitatori la possibilità di raccontare le proprie esperienze o partecipare a veri e propri esperimenti scientifici. Sorprendere, perché vogliamo che il pubblico ritorni: Science Gallery non deve essere un luogo dove si va a vedere una mostra, ma un posto dove è piacevole tornare spesso. Per questo motivo le nostre installazioni sono esclusivamente temporanee.

In alcuni casi definite i vostri programmi addirittura «sovversivi». In che senso?

Le rispondo con un esempio. Recentemente il King's College di Londra ha ospitato per Science Gallery un'installazione di Kuang-Yi Ku, un dentista e artista taiwanese che ha inventato una speciale protesi che rende più stimolanti i rapporti sessuali orali. L'esposizione ha voluto rappresentare uno spunto forte per parlare del tumore alla gola, che è la forma di cancro più in crescita tra gli adolescenti in Inghilterra. Nonostante al King's College qualcuno abbia storto il naso, l'obiettivo è stato perfettamente centrato: molti mezzi di informazione ne hanno parlato e abbiamo ricevuto i ringraziamenti del presidente della Oral Health Foundation britannica per aver dato visibilità a un tema di cui solitamente si evita di parlare.

Ecco, in questo senso i nostri programmi sono a volte sovversivi e spudorati: per parlare di scienza, tecnologia e arte è bello non



porsi limiti e soprattutto non avere quel senso di autocensura che molti musei e *science center* continuano ad avere. Il fatto di rivolgerci a un pubblico di giovani adulti, e non bambini, rende possibile questo approccio.

In che modo a Science Gallery si incontrano scienza e arte?

Scienza e arte condividono un elemento fondamentale: la creatività. Naturalmente i processi creativi alla base di queste due discipline sono molto diversi, ma noi cerchiamo di farli convergere.

A volte può capitare che la scienza passi anche in secondo piano, facendo semplicemente da sfondo alla creatività artistica. Il tutto però mantenendo sempre una forte coscienza del ruolo della scienza nella società: da noi non c'è spazio per bufale oppure per pseudoscienze.

Lei è arrivato a Science Gallery forte di una lunga esperienza internazionale nella comunicazione della scienza, in particolare nel settore dei science center. Come e quanto queste strutture sono cambiate rispetto a quando ha iniziato?

Sicuramente oggi i *science center* sono più commerciali e sofisticati, mentre originariamente erano nati proprio come strutture più sovversive e di confronto. Si può dire che ora sono elementi di «sistema», e per certi versi questo è un peccato, perché



Andrea Bandelli si è laureato in Economia a Trieste, conseguendo poi un master in comunicazione della scienza alla Scuola internazionale di studi avanzati (SISSA) e un dottorato in scienze sociali alla Vrije Universiteit di Amsterdam.

Negli ultimi vent'anni ha guidato nu-

merosi progetti europei di comunicazione della scienza, in particolare nel settore della didattica informale e delle nuove tecnologie, e collaborato con alcuni tra i più prestigiosi science center internazionali, tra cui il New Metropolis di Amsterdam, lo Science Museum di Londra

e l'Exploratorium di San Francisco.

Da aprile 2016 è direttore esecutivo della rete Science Gallery International, che dal 2019 includerà Venezia (venice.sciencegallery.com). A gennaio 2017 è stato tra i 40 Cultural Leader invitati al World Economic Forum di Davos.



In giro per il mondo. Installazioni del network internazionale Science Gallery, presto anche in Italia, a Venezia, i cui valori fondanti sono tre: connettere, partecipare, sorprendere.

hanno perso quell'agilità che li caratterizzava in passato. Inoltre, prima erano molto più integrati nelle università, il che rappresentava una garanzia di qualità.

Al tempo stesso ci sono stati però anche sviluppi interessanti: per esempio noto finalmente la presenza di una maggiore attenzione all'uso della tecnologia e del Web nella comunicazione della scienza, un aspetto che è sempre stato un punto molto dolente nei science center. Ma anche su questo si potrebbe fare di più.

Si tratta di tendenze generali oppure ci sono differenze tra i vari paesi?

Sono abbastanza generali, anche se ci sono differenze di approccio, specie tra la realtà europea e quella statunitense. Negli Stati Uniti i science center sono concepiti molto più come strutture di intrattenimento e di supporto al sistema scolastico, quindi di didattico. In Europa c'è sicuramente un'attenzione più profonda al ruolo giocato dalla scienza e dalla tecnologia nella società, soprattutto grazie ai molti progetti di comunicazione della scienza finanziati dalla Commissione Europea negli ultimi anni.



Secondo lei in quale direzione dovrebbero muoversi i science center in futuro?

Dovranno essere ancora più «dentro» il presente, in grado di raccontare il tessuto sociale. Viviamo in un'epoca piena di conflitti e di problemi sociali, spesso fortemente legati alla scienza e alle nuove tecnologie, e non si può più pretendere che i science center rimangano in un ambiente etereo e separato, senza confrontarsi con questi problemi. Penso che in futuro questo aspetto diventerà determinante per il successo dei science center.

Come vede la situazione italiana? Che cosa significherà l'arrivo di Science Gallery a Venezia?

Vivendo da 22 anni all'estero, non ho una conoscenza profonda della realtà italiana, tuttavia da «esterno» posso dire che alcuni centri italiani, per esempio la Città della Scienza di Napoli e il Museo della scienza e tecnologia di Milano, godono di una fama molto importante in Europa. A differenza di questi grossi centri di eccellenza, il nostro progetto si muoverà in una dimensione più legata al territorio: Science Gallery Venice non è pensata per i turisti, ma per coinvolgere il pubblico locale, in stretta collaborazione con l'università. E potrà diventare un punto di riferimento nuovo in Italia per stimolare la creatività scientifica e artistica dei giovani.



La via passiva all'aria pulita

Anemotech ha sviluppato un tessuto multistrato che assorbe gli inquinanti e rende più salubre l'ambiente sfruttando il naturale ricircolo dell'aria

Migliorare la qualità dell'aria che respiriamo in casa o in ufficio senza dover accendere, spegnere, posizionare ogni volta che entriamo o usciamo alcun apparecchio. Togliere le particelle inquinanti presenti nell'aria delle città senza dover limitare il traffico o azionare strumenti. Insomma, rendere il lavoro di «pulizia» dell'inquinamento invisibile e silenzioso. In una parola, passivo.

È l'idea che girava in testa a Gianmarco Cammi: «Ho sempre lavorato nel campo della riduzione dell'inquinamento e per questo mi è sempre stato chiaro quanto fosse insalubre l'aria che respiriamo non solo per strada, ma soprattutto in casa o in ufficio». L'esigenza di trovare una soluzione aumenta quando l'imprenditore diventa padre: «Cosa potevo fare per migliorare l'aria che respirano i miei figli?». Cammi un'ipotesi di lavoro ce l'ha: creare un oggetto passivo che, per purificare, sfrutti i flussi di aria fredda e calda presenti negli edifici. Un quadro, una tenda, una parete coperta di un tessuto speciale che mangia l'inquinamento. Due investitori decidono di dare fiducia a questa idea e parte il progetto.

In ogni ambiente

La prima mossa è trovare un partner scientifico per mettere a punto il giusto mix di materiali da usare e poi cominciare prove sul campo per verificarne l'efficacia. La scelta cade sul gruppo di ricerca guidato da Gabriele Fava del Dipartimento di scienze e ingegneria della materia, dell'ambiente e dell'urbanistica dell'Università Politecnica delle Marche ad Ancona. Con loro inizia un percorso - non ancora terminato - che in tre anni ha portato alla registrazione di un brevetto e alla nascita di The Breath®, un tessuto multistrato che rende più salubre l'ambiente funzionando in maniera del tutto passiva. «Anemotech è stata costituita nel 2014, subito dopo l'acquisizione del brevetto. Pur essendo una *start-up*, prima di presentare il prodotto abbiamo scelto di investire tempo e oltre 600.000 euro in ricerca e sviluppo, lavorando a un rigoroso programma di validazione scientifica», spiega Cammi.

The Breath® è composto da due strati esterni in tessuto idrorepellente con proprietà battericide, antimuffa, e antiodore e uno intermedio in fibra adsorbente carbonica con aggiunta di nanomolecole, capace di separare, trattenere e disgregare le microparticelle inquinanti presenti nell'atmosfera. Il sistema «lavora» in modalità passiva e a impatto zero: non ha bisogno di essere attivato né alimentato da fonti energetiche esterne di origine elettrica o fossile perché sfrutta unicamente la naturale circolazione dell'aria. «La nostra tecnologia è attivata dal moto convettivo naturale dell'aria, di cui non ci accorgiamo nemmeno», spiega ancora Cammi.

La collaborazione tra laboratorio di Anemotech e polo accademico di Ancona porta a test sui materiali di cui è composto il tessuto adsorbente, che dimostrano la capacità della trama car-

LA SCHEDA

Anemotech

Fatturato
n.d.

Investimenti in ricerca
600.000 euro

Dipendenti/collaboratori
n.d.

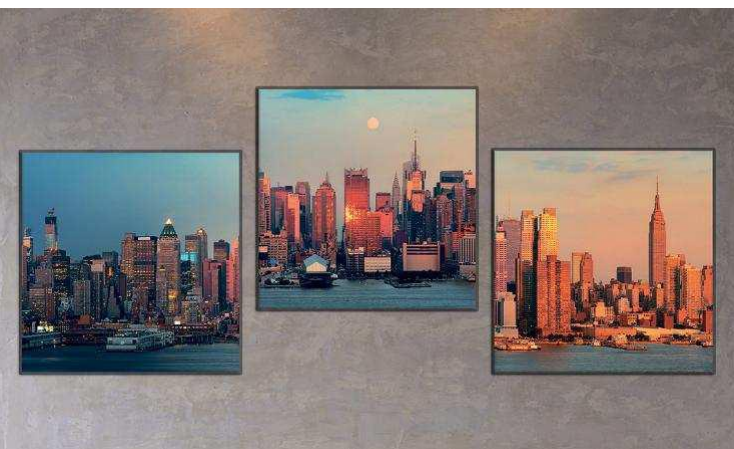
Brevetti rilasciati
1



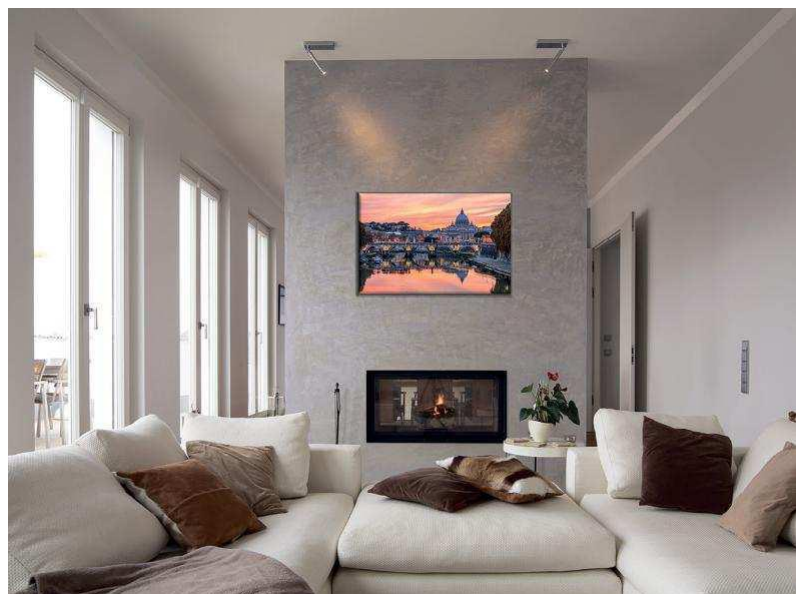
boniosa di abbattere i valori degli ossidi di azoto e dei composti organici volatili (per esempio toluene, benzene, isobutilene). L'efficacia di The Breath® è stata poi testata sul campo collocando pannelli in ambienti interni (*indoor*) ed esterni (*outdoor*).

Riguardo all'ambiente interno sono state effettuate due sperimentazioni presso un'ala interna del plesso scolastico «Vittorino da Feltre» a Piacenza e in un'aula priva di finestre comunicanti con l'esterno della facoltà di ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche, dove i pannelli The Breath® hanno dimostrato di intrappolare nello strato interno inquinanti come nitrato, acetato, solfati e anidride carbonica in maniera continuativa, con una riduzione media dell'inquinamento del 20 per cento.

All'esterno, invece, circa 140 metri lineari di pannelli sono stati esposti per quattro mesi sulla cancellata perimetrale superiore dello stadio «Giuseppe Meazza» di Milano e dai test è emer-



Per casa e città. Esempi di applicazioni del tessuto anti-inquinamento da Anemotech in ambienti interni, sotto forma di oggetti personalizzati, per esempio quadri, ed esterni, a Milano, in collaborazione con Urban Vision.



sa la capacità del sistema di «catturare» composti organici volatili per in media 116,50 milligrammi per metro quadrato al giorno e di rimuovere particolato secondario (PM 1.0 – PM 2.5) per 19 milligrammi per metro quadrato al giorno. Un secondo test ha invece coinvolto una superficie complessiva di 102 metri quadrati di pannelli posizionati nella cancellata adiacente di una centrale cogenerativa vicino a Milano. Le analisi eseguite dopo un mese da una centralina di monitoraggio hanno mostrato che The Breath® ha sottratto circa 12.000 microgrammi per metro quadrato di biossido di azoto (NO_2), e valori altrettanto elevati di altri agenti inquinanti come O_3 , CO, SOx e PM 2.5. I test hanno dato indicazioni anche sulla durata dell'efficacia dei pannelli che indoor è valutata in 1 anno, mentre per l'outdoor è, di 4-6 mesi a secondo della stagione e del tipo di inquinanti a cui sono esposti.

Per le aree urbane

I risultati hanno convinto Urban Vision, azienda leader nei restauri sponsorizzati, a usare The Breath® su ponteggi, cantieri di restauro o lavori di riqualificazione urbana; creando così l'opportunità per una campagna pubblicitaria di contribuire a risolvere l'emergenza inquinamento nelle aree urbane. All'Università Politecnica delle Marche hanno stimato che l'applicazione di The Breath® sui 31.400 metri quadrati complessivi gestiti da Urban Vision a Roma e Milano avrà un impatto sull'inquinamento dell'aria paragonabile all'annullamento delle emissioni di 13.902.700 autoveicoli in un anno. In particolare, a Roma sarebbe come togliere ogni giorno dalla strada 20.442 dei circa 160.000 autoveicoli che circolano quotidianamente sul Grande raccordo anulare; a Milano, sarebbe come annullare ogni giorno le emissioni inquinanti di 17.649 dei circa 94.000 veicoli che transitano in Area C.

Non stupisce quindi che Legambiente abbia deciso di lavorare con Anemotech per promuovere una maggiore consapevolezza del rischio legato all'inquinamento indoor e che Umberto Veronesi abbia accettato di essere *beta tester* di The Breath® nella sua residenza. Chi volesse seguirne l'esempio può personalizzare i pannelli e farli diventare quadri da appendere in salotto o in camera da letto. In attesa che con il tessuto mangia-inquinamento vengano prodotti vestiti o rivestimenti per passeggiini.



Il pendolo delle specie

Due studi illustrano il dibattito su tempi e modi del processo di speciazione

L'evoluzione è un processo continuativo di cambiamento, un flusso incessante di trasformazioni. Non prevede interruzioni né misteriosi salti ontologici. Eppure da questa continuità nascono entità discrete: le specie. Come è possibile?

Per Charles Darwin, la soluzione era tutta a favore del flusso: a suo avviso le specie erano più che altro etichette che i naturalisti appiccicano sopra gruppi di organismi, fossili o viventi, che si assomigliano. Non hanno una realtà oggettiva, sono convenzioni per fare ordine nel mondo. Le varietà infatti diventano specie senza soluzione di continuità e le specie sfumano l'una nell'altra gradualmente. Porre distinzioni nette sarebbe un atto di arbitrio.

Oggi sappiamo che non è esattamente così, perché le specie presentano un confine oggettivo che le separa di fatto e che è indipendente dalla maggiore o minore somiglianza morfologica: l'isolamento riproduttivo, cioè l'interruzione del flusso genico tra due popolazioni. Pur con molte eccezioni, tra gli organismi che si riproducono sessualmente si instaurano barriere genetiche che legittimamente permettono ai naturalisti di distinguere le specie come entità discrete. Secondo Ernst Mayr, la causa scatenante dell'isolamento riproduttivo è una separazione fisica tra le popolazioni: affinché vi sia speciazione, una barriera geografica deve tradursi in una barriera genetica.

Da qualche tempo, però, il pendolo tra continuo e discreto sembra tornare indietro verso l'originaria visione darwiniana. Nuove comunità riproduttive nascono anche in assenza di separazione geografica: basta una divergenza comportamentale (nei riti di accoppiamento o per uno sfasamento temporale) o una specializzazione nello stesso territorio in nicchie ecologiche diverse, che causa una ramificazione delle specie per selezione naturale o sessuale (come Darwin aveva intuito enunciando nel 1850 il «principio di divergenza», ovvero del vantaggio derivato dalla divergenza dei caratteri). Una molteplicità di meccanismi spiega l'insorgere dell'isolamento riproduttivo: ostacoli meccanici, comportamentali e genetici all'accoppiamento; ridotta sopravvivenza o fertilità degli ibridi. Così un insieme di fattori microevolutivi (all'interno delle popolazioni) causa un fenomeno macroevolutivo, cioè la nascita di una nuova specie o di un gruppo di specie.

Mesi fa, ricercatori di Montpellier, Losanna e Klosterneuburg hanno pubblicato su «PLOS Biology» un articolo sulla «zona gri-

gia» del differenziamento genetico che porta alla speciazione, misurando la divergenza genetica in 61 coppie di specie diverse o di popolazioni diverse della medesima specie e giungendo alla conclusione che dentro un *continuum* di divergenza genetica neutrale esisterebbe una finestra universale (tra lo 0,5 e il due per cento di divergenza, indipendentemente dalla biologia e dall'ecologia delle specie considerate) in cui la speciazione sta avvenendo ma non è ancora completa. Le barriere possono formarsi in vari modi e l'orologio della speciazione può correre più o meno velocemente, ma quella soglia sembra comune a tutte le specie.

A metà febbraio su «Nature» sono stati pubblicati i risultati di



In doppia battuta. L'evoluzione degli uccelli è stata caratterizzata da una prima fase di grandi cambiamenti morfologici, seguita da una seconda di raffinamenti di piccola scala.

uno studio comparativo su vasta scala sulla morfologia dei becchi, coordinato all'Università di Sheffield da Gavin H. Thomas, da cui si evince che gli uccelli si sono evoluti attraverso una prima fase esplosiva di speciazioni portatrici di grandi cambiamenti morfologici adattativi (una radiazione su vasta scala causata dall'occupazione di nicchie ecologiche disponibili), seguita da una fase di variazioni sui temi, cioè raffinamenti selettivi di dettaglio e su piccola scala. L'evoluzione non segue mai una via sola e gli schemi di cambiamento sono plurali. La speciazione può avvenire in tempi e modi differenti, attraversando ogni volta quella stessa zona grigia di divergenza genetica. Darwin e Mayr avevano visto, ciascuno, una parte del vero.



di Edoardo Boncinelli
Università Vita-Salute San Raffaele, Milano

Una riparazione imperfetta

Esiste un comune denominatore per molte malattie neurodegenerative?

Con il progressivo aumento della vita media, sono balzate in primo piano le malattie neurodegenerative, tipiche dell'ultima parte della nostra vita. Di malattie come l'Alzheimer o il Parkinson si sente parlare sempre più spesso, per menzionare le più note, e considerando che fino a qualche decennio fa il termine «malattia di Alzheimer» era pressoché sconosciuto. Per molte di queste malattie, che possono colpire parti diverse del sistema nervoso, compreso il cervello, un trattamento terapeutico non è neppure in vista, nonostante il moltiplicarsi degli annunci in proposito, essenzialmente perché non se ne conoscono né cause né ragioni della tragica progressione. Di recente sembra però sia emerso un possibile comune denominatore per molte di loro, da individuare in un imperfetto meccanismo di riparazione dei danni presenti nella molecola del DNA delle cellule (si veda Nicolas C. Hoch, in «Nature», Vol. 541, pp. 87-91).

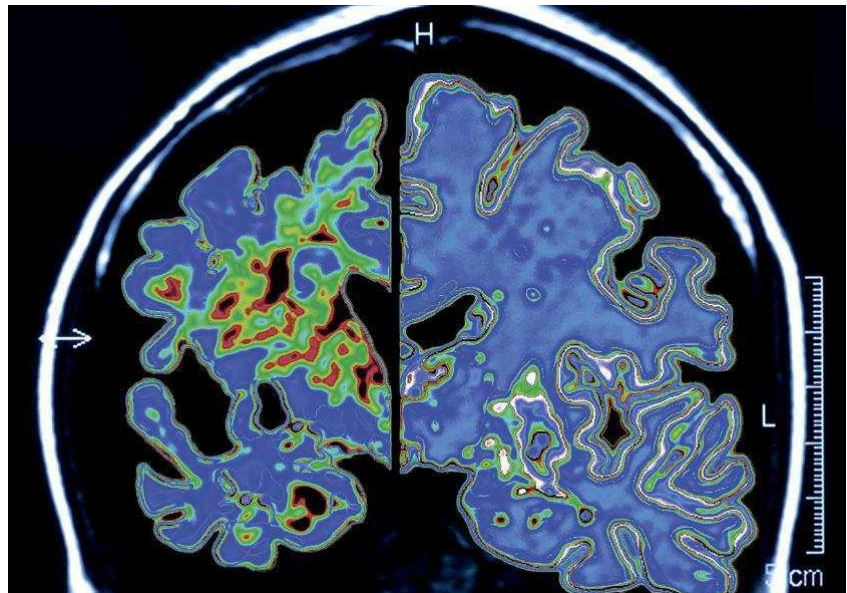
La doppia elica del DNA è spesso sede di modificazioni strutturali, magari piccolissime. Queste modificazioni, dette mutazioni, si generano continuamente per la relativa imperfezione del meccanismo di duplicazione del DNA e nella maggior parte dei casi hanno un trascurabile effetto. D'altra parte, se non ci fossero, non ci sarebbe alcuna evoluzione, che trova il suo alimento più sostanzioso dalla loro comparsa, in tempi diversi e in localizzazioni diverse del genoma dei membri delle diverse specie. Non tutte però hanno il tempo di mostrare i loro effetti, perché esistono diversi meccanismi di riparazione finalizzati all'eliminazione del difetto o, almeno, a una sua minimizzazione: questi meccanismi appartengono al capitolo della «riparazione del DNA», un capitolo a sé nella regolazione degli esseri viventi. A loro volta, alcuni di questi meccanismi di riparazione possono fallire, in tutto o in parte, e lasciare un qualche residuo disfunzionale.

La riparazione del danno presente sul DNA può prendere varie forme, spesso in dipendenza dal tipo di mutazione. Un passo obbligato è l'eliminazione della breve sequenza mutata e l'operazione comincia spesso con un taglio su una delle due eliche del DNA in corrispondenza della detta sequenza. Dopo il taglio, un complesso di enzimi presenti nel nucleo della cellula «erode» la sequenza errata e un altro complesso di enzimi la risintetizza nella sua forma «giusta», sulla base della sequenza presente sull'altra elica. Esistono però danni al DNA che consistono semplicemente in un taglio fat-

to solo su una singola elica, per esempio a opera dell'ossigeno attivato da sostanze nocive dette genericamente «ossidanti». In questi casi non c'è bisogno ovviamente di fare il primo taglio sulla singola elica, perché è già presente e nella posizione giusta.

Due enzimi coinvolti in tutte queste operazioni sono XRCC1 e PARP. Ebbene, in molti pazienti che mostrano malattie neurodegenerative, anche molto diverse tra di loro, sono stati riscontrati difetti nei due enzimi o nei geni che li codificano. Il fenomeno potrebbe dunque essere implicato direttamente o indirettamente nella loro generazione.

La scoperta ci dice almeno due cose. In primo luogo, ci ricor-



Il malfunzionamento di due enzimi potrebbe essere all'origine di malattie come l'Alzheimer (confronto tra sezioni di cervello sano, a destra, e colpito da Alzheimer).

da l'importanza dei meccanismi di riparazione del DNA, poco appariscenti quando funzionano alla perfezione, ma fondamentali in tutte le cellule per l'intera vita, e soprattutto nell'età avanzata, quando si sono accumulati molti danni sul DNA e molti meccanismi di correzione cominciano a essere un po' difettosi.

In secondo luogo, ci dimostra che le cause delle malattie che si troveranno d'ora in poi saranno sempre più complesse e difficili da scovare; quelle «facili» sono state infatti già scoperte e ora tocca a quelle difficili. L'importante è non scoraggiarsi e avere fede nel metodo scientifico, l'unico che dà risultati certi e riproducibili, anche in questo disgraziatissimo paese che va dietro alle fanfaluche più assurde.

di Piergiorgio Odifreddi

professore ordinario di logica matematica all'Università di Torino
e visiting professor alla Cornell University di Ithaca (New York)



Analogie matematiche

La matematica secondo André Weil, una delle più grandi menti del Novecento

In una lettera del 26 marzo 1940, pubblicata in *La fredda bellezza* (Castelvecchi, 2014), il famoso matematico André Weil provò a raccontare alla famosa sorella filosofa Simone qualcosa del suo lavoro, avvertendola: «Ti sembrerà forse di comprenderne l'inizio, ma non capirai nulla di quanto segue». In effetti parlava di cose tecniche, ma almeno un pensiero centrale riuscì a convogliarlo in parole semplici: il ruolo dell'analogia nella scoperta matematica, grazie a cui cose diverse a un livello concreto vengono viste come manifestazioni di una stessa cosa a un livello astratto.

Nella relazione *Dalla matematica alla metafisica*, tenuta a un convegno del 1960 e contenuta anch'essa nel libriccino citato, Weil ripeté: «Come fanno tutti i matematici, nulla è più fecondo di queste oscure analogie, questi indistinti riflessi tra una teoria e un'altra, queste certezze furtive, queste indecifrabili foschie, e nulla dà maggior piacere allo studioso. Poi, un giorno, l'illusione svanisce, il presentimento diventa certezza, le teorie gemelle rivelano la loro origine comune prima di svanire. Come insegna la *Bhagavad Gita*, si giunge alla conoscenza e all'indifferenza allo stesso tempo. La metafisica è diventata matematica, pronta a formare la materia di un trattato la cui fredda bellezza non saprà più emozionarci».

Alla sorella spiegava così l'utilità di questo procedimento: «La matematica moderna ha assunto un'estensione e una complessità tali che è diventato urgente, se la matematica deve continuare a esistere e non vuole dissolversi in un ammasso di piccoli ambiti di ricerca, portare a termine un enorme lavoro di unificazione che assorba in alcune teorie semplici e generali tutto il substrato comune di diverse branche della scienza, sopprima le cose inutili e lasci intatto ciò che costituisce effettivamente l'aspetto specifico di ogni grande problema».

Queste righe riassumono il programma di lavoro che André Weil aveva iniziato a portare avanti proprio in quegli anni, insieme agli altri matematici del gruppo Bourbaki, per la rifondazione della matematica sulla base del concetto di struttura. Le «teorie semplici e generali» che aveva in mente erano dunque quelle in-

siemistiche, algebriche, topologiche e analitiche in seguito descritte nei molti volumi degli *Elementi di matematica*, usciti a partire dal 1939.

Visti il periodo storico in cui scriveva alla sorella, Weil propose un'analogia militare: «In tutto ciò ci sono dei grandi problemi di strategia. Ed è tanto comune conoscere la tattica quanto è raro comprendere la strategia. Paragonerei dunque, malgrado l'incoerenza delle metafore, questi grandi edifici assiomatici alle comunicazioni nelle retrovie: non si è mai ottenuta molta gloria negli uffici dell'amministrazione, né nei convogli di equipaggiamento, ma cosa si farebbe se molta brava gente non si consacrava a que-

sti bisogni subalterni? Il rischio è che i diversi fronti finiscano per ignorarsi reciprocamente, come gli Ebrei nel deserto, o per perdere tempo, come Annibale a Capua».

Naturalmente i fronti aperti della matematica si dispiegano non soltanto nello spazio, ma anche nel tempo. E il punto di vista privilegiato per osservare il divenire delle analogie, che nel corso del tempo divengono teoremi e teorie, è la storia della matematica stessa. Un'impresa nella quale André Weil, come racconta la figlia Sylvie in *Casa Weil* (Lantana, 2013), «aveva deciso di riciclarsi negli ultimi decenni della sua vita, invece di deprimersi come certi suoi vecchi colleghi che si ostinavano a fare matematica con un cervello diventato meno duttile». In questo caso il risultato fu la grande *Teoria dei numeri* (Einaudi, 1993), che spazia da Fermat a



Legendre ed è considerata un imperituro capolavoro.

Lo spirito che anima il libro era già stato anticipato da André Weil in un'altra lettera alla sorella, del 29 febbraio 1940: «La matematica non è altro che un'arte, una specie di scultura in un materiale estremamente duro e resistente, come certi porfidi usati a volte dagli scultori. Il matematico è talmente sottomesso al filo e al controfilo, alle curvature e alle imperfezioni della materia lavorata, che questo conferisce alla sua opera una forma di oggettività. Si produce in tal modo un'opera d'arte, ma mentre la critica dell'arte è un genere vano e vuoto, la sua storia è forse possibile. Per quanto ne so, però, non si è mai fatta la storia della matematica in questo modo». Fino al suo libro, appunto.



di Amedeo Balbi

Professore associato di astronomia e astrofisica presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma «Tor Vergata». Il suo ultimo libro è *Dove sono tutti quanti?* (Rizzoli, 2016)

Ritratto di un buco nero

Una tecnica ingegnosa osserverà uno di questi oggetti al centro della nostra galassia

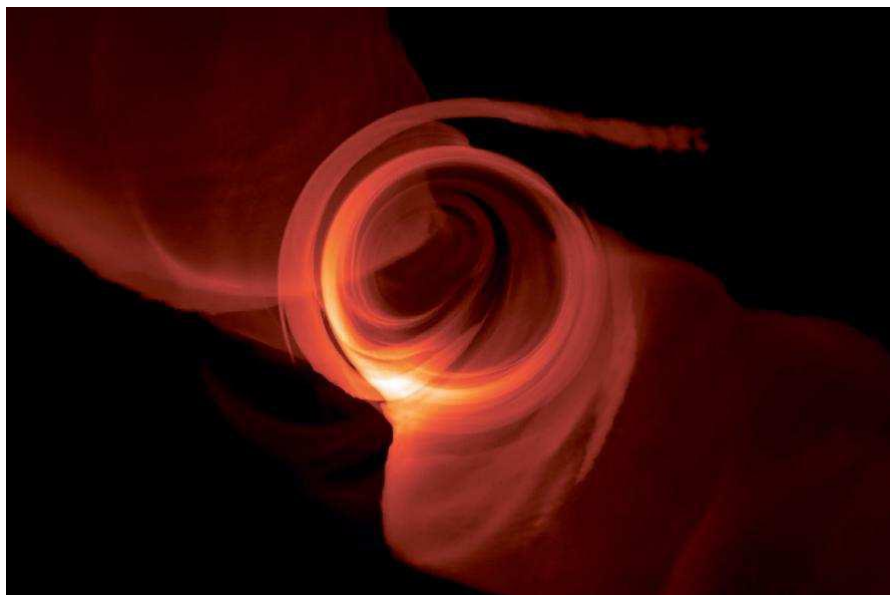
In una ipotetica top ten degli oggetti più affascinanti dell'universo, i buchi neri occuperebbero sicuramente una delle prime posizioni. Parte della loro attrattiva sta nel mistero che li circonda: il fatto è che si nascondono bene. Fino a non molto tempo fa, potevamo dedurre la loro presenza solo da segnali indiretti, per esempio dall'enorme energia sprigionata dalla materia che precipita nel loro pozzo gravitazionale. Da poco più di un anno abbiamo un'evidenza in più, dopo che l'interferometro LIGO ha captato le onde gravitazionali prodotte durante la collisione di due buchi neri di piccole dimensioni (si fa per dire).

Ora, però, potremmo essere davvero vicini a guardare in faccia uno di loro: il buco nero massiccio che si trova, con ogni probabilità, al centro della nostra galassia. Che da quelle parti si nasconda qualcosa di grosso lo sappiamo da parecchio. Intanto, per la presenza di un'intensa e compatta sorgente di onde radio, nota come Sagittarius A* (o Sgr A*), dal nome della costellazione in cui viene a cadere la direzione del centro galattico. Poi, perché il moto delle stelle che orbitano nei pressi di Sgr A*, tenuto sotto osservazione per oltre 16 anni, ha permesso di dedurre la massa della sorgente: circa quattro milioni di volte la massa del Sole, in un raggio poche decine di volte più grande di quello della nostra stella. In base a ciò che sappiamo sul funzionamento della gravità, non ci sono molti dubbi sul fatto che Sgr A* sia un buco nero.

La prova del nove sarebbe osservarlo direttamente, ma la cosa è complicata. Non tanto perché un buco nero è, appunto, nero: in realtà, come detto, ci aspettiamo che nei suoi paraggi le cose siano piuttosto movimentate, e dovremmo quindi riuscire a vedere il luminoso disco di accrescimento che lo circonda, prodotto dalla materia che vortica, caldissima, prima di sparire per sempre nelle sue fauci. Il problema sta nel fatto che tra noi e il centro della galassia è disseminata una grande quantità di polvere e gas, che assorbe quasi tutta la radiazione elettromagnetica, lasciando passare solo quella a frequenza più bassa, ovvero le onde radio. E, purtroppo, osservare un oggetto grande poco più della nostra stella, a circa 26.000 anni luce di distanza, richiede un potere risolutivo proibitivo per un radiotelescopio: ci vorrebbe un'antenna grande come tutta la Terra. Come si fa, allora?

Negli ultimi anni, i radioastronomi hanno messo a punto una tecnica ingegnosa, la Very Long Baseline Interferometry (VLBI), cioè interferometria a base molto ampia. Si tratta, in sostanza, di combinare il segnale ricevuto da radiotelescopi disseminati in varie posizioni della Terra, in modo da riprodurre quello che vedrebbe un'unica antenna di dimensioni paragonabili alla distanza massima tra le antenne del sistema. La tecnica, che richiede lunghe e sofisticate elaborazioni su supercalcolatori dopo la raccolta dei dati, è già stata applicata con successo, ma sta per fare un salto di qualità importante proprio in questi giorni.

Tra il 5 e il 14 aprile, una grande rete di radiotelescopi che com-



Bagliori nel buio. La materia fagocitata da un buco nero in traiettorie spiraleggianti produce un luminoso disco di accrescimento, come mostra questa simulazione.

prende tra gli altri il nuovo arrivato ALMA dell'European Southern Observatory, situato in Cile, proverà a osservare Sgr A* con una risoluzione così alta da poter osservare direttamente l'orizzonte degli eventi del buco nero (ovvero, la regione da cui neanche la luce può uscire). L'ambizioso progetto si chiama, appunto, Event Horizon Telescope, e, se tutto andrà bene, ci mostrerà una buia *silhouette* circolare, avvolta dal bagliore del disco di accrescimento (si veda *La prova dei buchi neri* in «Le Scienze» n. 567, novembre 2015). Per avere le prime immagini dovremo aspettare fino al 2018: a quel punto, forse, potremmo dire di aver visto per la prima volta come è fatto un buco nero, e capire se era davvero come lo avevano immaginato i nostri modelli teorici.



Il mosaico dei denisoviani

Due crani trovati in Cina fanno luce sull'identikit di questa misteriosa specie umana

Gli autori dell'articolo di «Science» del mese scorso, riguardante i due crani scoperti a Xuchang in Cina, non lo dicono. Tuttavia, su molti siti web di informazione scientifica quei due crani vengono interpretati come capaci di dare forma agli enigmatici «denisoviani». A questa conclusione si può arrivare, in effetti, leggendo l'articolo e guardando le immagini dei nuovi reperti fossili; ma vediamo di capire meglio.

In primo luogo: chi furono i «denisoviani»? Molti lo sanno e noi ne abbiamo parlato almeno un paio di volte. Nel tardo Pleistocene – quando in Europa e in regioni medio-orientali vivevano i Neanderthal, quando la nostra specie si stava ormai prepotentemente diffondendo dall'Africa e nel Sudest asiatico c'erano gli ultimi *Homo erectus* – l'Asia continentale era popolata da un'umanità di cui sappiamo ancora assai poco sul piano morfologico, ma moltissimo su quello genetico. Le informazioni derivano da una porzione di falange, ricchissima di DNA, scoperta una decina d'anni fa nella grotta di Denisova sui Monti Altai, quasi al confine tra Siberia e Mongolia. Oltre a questo frammento, a Denisova sono stati trovati anche due denti dall'aspetto «arcaico», che pure hanno fornito interessanti dati paleogenetici.

Dunque, dai reperti della grotta eponima non abbiamo informazioni significative sulla morfologia dei «denisoviani», ma i dati genetici ci fanno intendere che: dovevano essere i discendenti asiatici di una grande specie, ancestrale anche ai Neanderthal e a noi *Homo sapiens* (candidato per questo ruolo è *Homo heidelbergensis*, che annovera fra i suoi possibili rappresentanti alcuni fossili del tardo Pleistocene Medio provenienti dall'India e dalla Cina: Narmada, Dali, Jinniushan); dovevano aver mantenuto un intenso flusso genico trans-siberiano con i Neanderthal, come indicano aspetti del loro DNA nucleare, ma come anche potrebbe suggerire un cranio fossile incompleto trovato sempre in Cina, a Maba, che mostra alcuni tratti da Neanderthal.

Pertanto, i dettagli rimangono sfocati, ma vari nuovi reperti dell'Asia continentale (e qui ne abbiamo citati solo alcuni) indicano che una grande specie umana, *Homo heidelbergensis* appunto, sia stata protagonista nel Pleistocene Medio di una diffusione geografica che, a sua volta, avrebbe rappresentato la radice comune dell'evoluzione in Europa dei Neanderthal, in Asia dei «denisovia-

ni» e in Africa di *Homo sapiens*. Prima che queste tre derivazioni evolutive di *Homo heidelbergensis* trovassero una loro identità come specie, cioè per lunga parte del Pleistocene Medio, è ragionevole che si sia mantenuto un certo flusso genico fra le diverse popolazioni della specie ancestrale, compreso quello trans-siberiano già menzionato.

Allora, una volta fatte (sia pure molto in breve) queste premesse, appaiono più chiare e interpretabili le caratteristiche dei due nuovi crani scoperti a Xuchang e descritte il mese scorso. Quello che infatti gli autori dell'articolo di «Science» ci dicono è che i nuovi fossili mostrano un mosaico di caratteri: da un la-



Tasselli del puzzle. Ricostruzione virtuale dei due crani di Xuchang, in Cina, sovrainpressa alla foto del sito archeologico dove sono stati scoperti i fossili.

to, manifestano affinità con popolazioni arcaiche di tutto il Vecchio Mondo (tratti da *Homo heidelbergensis*), dall'altro mostrano elementi di continuità regionale di tipo asiatico (frutto di incroci con *Homo erectus*?) e, al tempo stesso, presentano tratti tipici dei Neanderthal, soprattutto nella regione occipitale e nella disposizione dei canali semicirculari dell'orecchio. Insomma, un bel ritratto di come potrebbero essere stati i «denisoviani».

Mi rendo conto che tutto ciò possa apparire un po' tecnico, ma dimostra quanto la scienza delle nostre origini, combinando dati da fonti diverse, si avvicini ormai spesso a proporre una narrazione sempre più dettagliata e attendibile dell'evoluzione umana nel tempo profondo.

CLIMA

Il motore climatico delle migrazioni

Un'analisi collega aumento delle temperature ed entità dei fenomeni migratori



Momento di pausa.

Migranti africani in sosta nel deserto del Chad. Il riscaldamento globale alimenta le migrazioni soprattutto dai paesi in via di sviluppo la cui economia dipende quasi del tutto dall'agricoltura. L'aumento delle temperature causa una diminuzione o una perdita dei raccolti, con conseguente diminuzione dei mezzi di sussistenza.

Nel mondo assistiamo a flussi migratori di grandi proporzioni da alcuni paesi in via di sviluppo a quelli sviluppati. Mentre questi ultimi si trovano quasi tutti alle latitudini medio-alte, molti dei primi sono ubicati nella fascia sub-tropicale.

Si fa un gran discutere delle cause di queste migrazioni forzate e, insieme alle guerre e ai regimi corrotti, molti puntano il dito sulle influenze di un clima che cambia. Alcuni studi portano a dare più importanza alle une o alle altre concause, ma comunque il clima è fra queste.

Fino a oggi mancava un'analisi quantitativa del meccanismo con cui i cambiamenti del clima possono influire sulle migrazioni. Ebbene, di recente questa lacuna è stata colmata da Ruohong Cai, dell'Environmental Defense Fund di New York e colleghi, che hanno pubblicato un articolo sul «Journal of Environmental Economics and Management» in cui riescono a esplicitare e quantificare il legame tra clima e migrazioni.

Riferendosi al trentennio 1980-2010, i ricercatori hanno usato i dati dei flussi migratori da 163 paesi in via di sviluppo a 42 paesi di destinazione (in gran parte nazioni sviluppate), i dati di temperature e precipitazioni nei paesi di origine delle migrazioni e, infine, i dati dei relativi raccolti agricoli. Una volta individuati i paesi di origine dei fenomeni migratori in cui l'economia è quasi del tutto dipendente dall'agricoltura, Cai e colleghi hanno trovato un

legame molto stretto tra aumento della temperatura e numero di migranti solo in questi paesi, mentre negli altri la relazione è quasi assente. Dunque le rese agricole sembrano il collegamento mancante tra cambiamenti del clima e migrazioni. Tutto questo è coerente con quanto documentato riguardo all'impatto negativo di un aumento di temperatura sulla produttività agricola.

La catena che induce migrazioni da molti paesi sarebbe dunque la seguente: l'aumento di temperatura conduce a diminuzione o perdita di raccolti, questa diminuzione, o perdita, non fornisce più i beni di sussistenza per le popolazioni, molti quindi migrano. In questo ambito, un risultato importante è la scoperta che la relazione tra temperature e migrazioni non è lineare. Dopo una certa soglia di aumento di temperatura, infatti, le migrazioni aumentano molto di più, come i raccolti diminuiscono drasticamente, con perdita totale e carestie.

Così, le strategie di adattamento e di recupero di terreni degradati saranno fondamentali per far diminuire il fenomeno migratorio da molti paesi, in particolare da quelli della fascia sub-sahariana. Inoltre, il recupero e la messa a coltura potrà permettere anche di diminuire le emissioni di gas serra da questi terreni, contribuendo a mitigare le stesse cause climatiche di migrazione. Insomma, si può innescare un circolo virtuoso.

Antonello Pasini

FISICA

Un big bang di onde gravitazionali

Subito dopo la nascita del cosmo hanno iniziato a propagarsi increspature dello spazio-tempo

Negli istanti successivi al big bang, nell'universo hanno iniziato a propagarsi onde gravitazionali primordiali che potrebbero essere rilevate dagli strumenti attuali. A proporre questa idea è un gruppo di fisici guidati da Stefan Antusch, dell'Università di Basilea, in Svizzera, che ha pubblicato i risultati di una ricerca teorica su «Physical Review Letters».

Previste dalla teoria generale della relatività, formulata nel 1915, e rilevate direttamente un secolo dopo, nel 2015, le onde gravitazionali sono increspature nel tessuto dello spazio-tempo, che si contrae e si dilata al loro passaggio. Queste onde sono tipicamente prodotte in processi astrofisici ad altissima energia, come l'esplosione di una supernova o la fusione di due buchi neri. Tuttavia, secondo i cosmologi, anche i primi istanti dell'universo sono stati testimoni della produzione di onde gravitazionali. Questo fondo stocastico (cioè casuale) di onde gravitazionali permea dunque lo spazio-tempo, esattamente come la radiazione cosmica di fondo a microonde. La differenza, sostanziale, fra i due fondi è che quest'ultima mostra com'e-

ra l'universo 380.000 anni dopo il big bang, mentre le onde gravitazionali, prodotte subito dopo il processo di inflazione, avvenuto circa 10^{-35} secondi dopo il big bang, ci svelerebbero le condizioni dell'universo appena nato, offrendoci dettagli chiave sulla sua origine.

Secondo Antusch e collaboratori, questo fondo di onde gravitazionali è stato proprio conseguenza diretta dell'inflazione, l'espansione rapidissima che portò l'universo nei suoi primissimi istanti di vita ad aumentare le proprie dimensioni di un fattore 10^{30} . Grazie a simulazioni numeriche centrate sul meccanismo inflattivo, i fisici teorici hanno calcolato, seppure applicando alcune importanti approssimazioni, la forma del segnale del fondo stocastico di onde gravitazionali, che mostra un picco pronunciato a una determinata frequenza.

Questo segnale potrebbe cadere anche negli intervalli di sensibilità degli attuali interferometri LIGO, negli Stati Uniti, e Virgo, in Italia, e quindi venire rivelato nei prossimi anni. Non resta dunque che attendere.

Emiliano Ricci



Composti organici su Cerere

Sulla superficie di Cerere ci sono composti organici: a osservarli è stato un gruppo di astronomi, molti dei quali italiani, guidato da Maria Cristina De Sanctis dell'Istituto di astrofisica e planetologia spaziali di Roma, dell'Istituto nazionale di astrofisica. La scoperta, pubblicata su «Science», è stata possibile grazie alle osservazioni della sonda Dawn, una missione della NASA lanciata nel 2007 e mirata allo studio dell'asteroide Vesta e del pianeta nano Cerere. In particolare, i dati sono stati registrati dallo strumento Visible and Infrared Spectrometer (VIR) a bordo della sonda, uno spettrometro realizzato dall'Agenzia spaziale italiana, con riprese a diverse lunghezze d'onda della superficie del pianeta nano durante sorvoli a diverse altezze dalla superficie (comprese fra 4300 e 385 chilometri).

I materiali organici osservati su Cerere, il corpo celeste di dimensioni maggiori nella fascia principale degli asteroidi compresa fra Marte e Giove, sono composti dalla struttura lineare o ramificata, individuati in una regione di circa 1000 chilometri quadrati vicino al cratere Emutet, distribuiti soprattutto a ridosso del cratere, ma anche in altre regioni più distanti e di minori dimensioni. Questi composti, assieme alla presenza di ammoniaca, ghiaccio d'acqua, sali carbonati e minerali idrati, mostrano che la superficie di Cerere ha tutti gli ingredienti di base per sostenere lo sviluppo di processi biologici. Ora la domanda si sposta sull'origine di questi composti. Al momento sono due le ipotesi dei ricercatori. Secondo la prima, le molecole organiche sarebbero state portate su Cerere da un altro corpo celeste che, scontrandosi con il pianeta nano, ne avrebbe contaminato la superficie. Ma l'ipotesi più accreditata è l'altra, secondo cui queste molecole avrebbero origine su Cerere, prodotte da attività idrotermale. Resta da capire come le molecole arrivino poi dall'interno alla superficie del pianeta nano.

Emiliano Ricci

Cortesia NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA (Cerere);
cortesia collaborazione Virgo (Virgo)

ECOLOGIA

De-estinzione oppure no?

Costi e benefici della creazione di specie simili a quelle estinte grazie all'editing genomico



L'ultimo annuncio è giunto da George Church, il biologo della Harvard University che è fra i padri della CRISPR, la nuova tecnica per realizzare modificazioni genetiche di alta precisione e con estrema facilità rispetto alle altre tecniche ideate per la medesima applicazione. Al meeting annuale dell'American Association for the Advancement of Science, Church ha annunciato che entro un paio d'anni, inserendo nel genoma dell'elefante asiatico un buon numero di geni del mammut lanoso, produrrà un embrione ibrido: il primo passo per riportare in vita il mammut, traguardo che richiederà forse una decina d'anni.

Il suo è solo uno dei progetti in corso per la de-estinzione: la creazione di specie molto simili a quelle scomparse a partire da specie affini viventi. Secondo Church, l'operazione favorirebbe la sopravvivenza in una forma alternativa dell'elefante asiatico, una specie minacciata, e aiuterebbe la salvaguardia ambientale della tundra. Ma alle tante remore suscitate dall'idea di riportare in vita una specie, sia in generale sia nel caso specifico del mammut, si aggiunge ora su «Nature Ecology & Evolution» quella di Joseph

Bennett, della Carleton University di Ottawa, in Canada. Secondo i suoi calcoli gli interventi di de-estinzione rischiano di essere controproducenti anche sul mero piano della conservazione, perché ridurrebbero la biodiversità complessiva, pur arricchendola localmente. Il nodo sono i budget, sempre risicati, della conservazione.

Bennett e colleghi hanno calcolato i costi e i benefici degli sforzi che occorrerebbero per reintrodurre e salvaguardare nei loro habitat originari le specie da poco estinte in Nuova Zelanda e nello Stato australiano del New South Wales, e li hanno confrontati con le spese per conservare le specie minacciate esistenti.

In Nuova Zelanda, con i soldi necessari a proteggere le 11 specie che si potrebbero ricreare se ne potrebbero salvare tre volte di più, e in Australia la difesa delle cinque specie da poco scomparse assorbirebbe addirittura le risorse necessarie a preservarne oltre 40 esistenti. «Quanto meno, se si sceglie di procedere con questi piani bisognerà valutare bene quali specie scegliere e dove reintrodurle», avverte quindi Bennett.

Giovanni Sabato

La resilienza della comunità di Paris

Negli Stati Uniti, nella piccola comunità rurale di Paris, in Idaho, è stato scoperto un deposito fossilifero risalente a 250,6 milioni di anni fa, poco più di un milione di anni dopo la crisi del Permiano, la più grande estinzione della storia, che colpì il 96 per cento delle specie marine. È una comunità fossile unica al mondo: 750 esemplari completi appartenenti a 30 specie marine vissute all'inizio del Triassico, un'epoca in cui gli oceani erano spopolati e le testimonianze paleontologiche pressoché inesistenti. I fossili erano stati scoperti anni fa da un appassionato, L.J. Krumenacker, oggi dottorando in geologia all'università del Montana, e tra i firmatari dello studio guidato da Arnaud Bayard dell'Université Bourgogne Franche-Comté, e pubblicato su «Sciences Advances». Insieme ad animali e piante sopravvissuti all'estinzione ci sono gruppi che si credevano comparsi solo centinaia di milioni di anni più tardi. Riemergono una specie di spugna che sembrava estinta 200 milioni di anni prima e un rettile che potrebbe appartenere al ramo evolutivo che avrebbe portato ai dinosauri. L'area di Paris fu probabilmente un rifugio marino isolato in cui la vita ebbe un'eccezionale resilienza e in cui molte specie sopravvissute all'estinzione poterono evolversi per poi ripopolare gli oceani.

Fabio Perelli

GENETICA

Quei geni dei Neanderthal

Analizzata l'espressione delle sequenze geniche neanderthaliane presenti nel nostro genoma

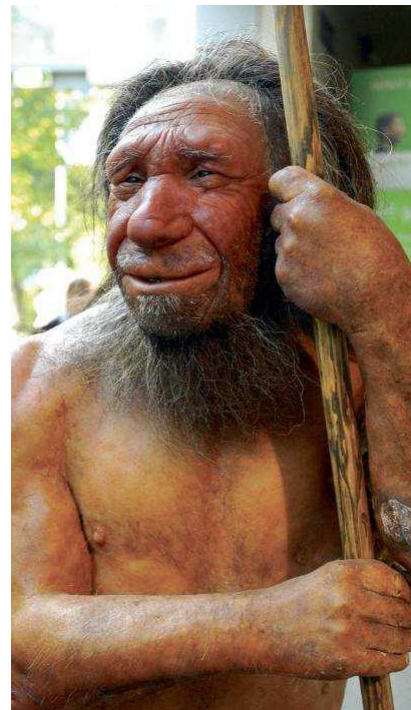
Circa 100.000 anni fa, in qualche area del Medio Oriente, gruppi di nostri antenati, allontanandosi dall'Africa, hanno incontrato bande di Neanderthal e si sono accoppiati con questa specie cugina. Le tracce di quegli antichi incontri possono essere osservate ancora oggi nel genoma degli esseri umani di tutte le popolazioni non africane. Un'eredità che non è rimasta senza conseguenze: molte sequenze di origine neanderthaliana hanno un impatto sull'espressione di geni della nostra specie e contribuiscono alla variabilità delle caratteristiche degli esseri umani. Lo rivela uno studio diretto da Joshua M. Akey della Università di Washington a Seattle che ha trovato un nuovo approccio per valutare l'impatto dei geni dei Neanderthal sulla nostra specie.

La presenza di un gene di Neanderthal nel genoma umano non rivela molto sul suo funzionamento: questo gene potrebbe anche restare silente, senza conseguenze sull'organismo. Per capirne di più bisogna studiare la molecola di RNA, che segnala l'espressione del gene. Analizzare l'espressione genica nei resti fossili non è

però una strada praticabile perché l'RNA si deteriora con il passare del tempo. I ricercatori si sono quindi concentrati su esseri umani attuali, analizzando l'espressione genica di un gruppo di soggetti eterozigoti per alcuni geni, cioè soggetti che per quei geni hanno sia una versione neanderthaliana sia una tipica della nostra specie. L'espressione di un gene può variare da tessuto a tessuto, per questo l'analisi ha incluso 52 diversi tessuti da varie parti del corpo. I risultati, pubblicati su «Cell», indicano che nel 25 per cento delle regioni studiate è possibile osservare una differenza tra espressione dell'allele umano e di quello neanderthaliano.

Nella regione del cervello e dei testicoli, l'espressione dell'allele dei Neanderthal è risultata particolarmente bassa: secondo i ricercatori, il dato suggerisce che queste parti del corpo hanno sperimentato un processo di evoluzione più rapido rispetto ad altre regioni. Alcuni dei geni per cui viene espresso l'allele neanderthaliano sembrano essere associati a malattie o a caratteristiche dell'organismo, come l'altezza.

Valentina Daelli



L'unicità genetica dei sardi

Nessuno in Europa è come i sardi. Gli abitanti dell'isola sono il frutto di un isolamento geografico e genetico senza eguali nel Vecchio continente, che ha conservato le tracce di un prezioso patrimonio antropologico. Il loro DNA è un archivio che documenta l'antico popolamento del continente europeo da parte di gruppi di cacciatori-raccoglitori che si pensava fossero stati soppiantati rapidamente da migranti giunti dal Vicino Oriente nel corso della rivoluzione neolitica.

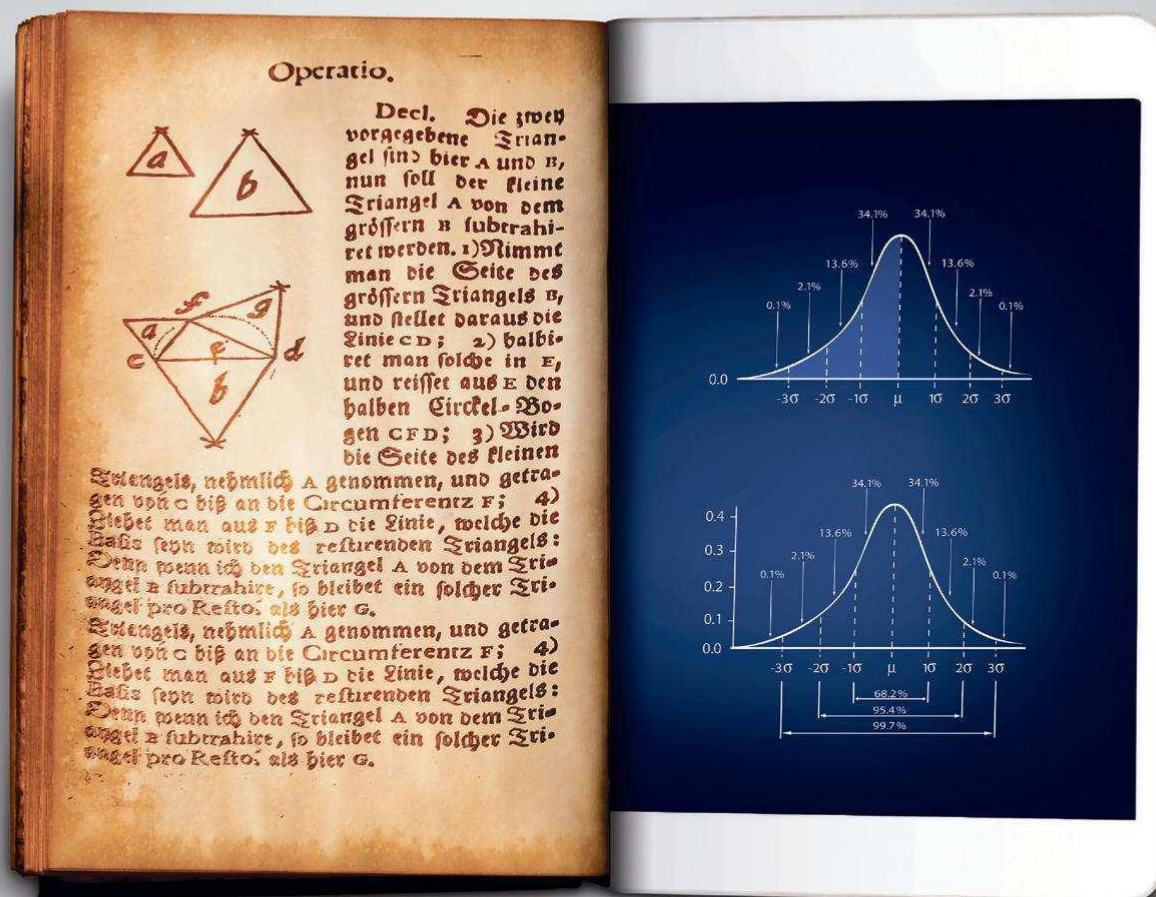
È il quadro che emerge dai risultati di uno studio effettuato dall'Università di Pavia e dall'Istituto di ricerca Genetica e biomedica del Consiglio nazionale delle ricerche, pubblicato su «Molecular Biology and Evolution» nell'ambito del progetto Italggenomics, lanciato nel 2012 insieme all'Università di Perugia per ricostruire la storia genetica del territorio italiano. Lo studio è stato basato sull'analisi del DNA mitocondriale, cioè il DNA presente negli organelli cellulari chiamati mitocondri, che si tramanda per via materna. Questo DNA è stato estratto da 3491 volontari e dalle spoglie di 21 soggetti datate tra 4000 e 6000 anni fa. I campioni sono stati poi confrontati con una banca dati mondiale di 50.000 genomi moderni e 500 antichi, che includevano tra l'altro il DNA di Ötzi, l'uomo di Similaun. Il confronto ha mostrato che il 78,4 per cento del genoma mitocondriale dei sardi deriva da 89 gruppi (o aplogruppi) esclusivi della Sardegna, di epoca post-nuragica, nuragica e neolitica. Il dato mette in risalto l'estremo isolamento a cui i sardi sono stati soggetti nel tempo, che stride con lo scenario di migrazioni e mescolamenti che ha caratterizzato la storia europea. Inoltre una percentuale del 3-5 per cento del genoma reca tracce di popolamenti più antichi, precedenti l'avvento dell'agricoltura nell'isola, che si colloca a circa 7800 anni fa. È una scoperta senza precedenti, che indica che è ancora possibile trovare nel DNA attuale indizi degli antenati paleolitici, che sopravvissero probabilmente in aree rifugio all'avanzata della rivoluzione neolitica.

Fabio Perelli

la Matematica

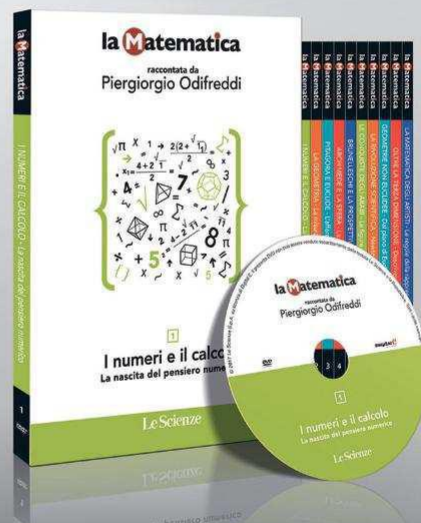
L'EVOLUZIONE DEL PENSIERO MATEMATICO DALL' ANTICHITÀ AD OGGI.

Opera composta da 10 uscite. Ogni uscita a 6,90 € in più con Le Scienze o la Repubblica.



PIERGIORGIO ODIFREDDI CI RACCONTA IL PROGRESSO DELLA SCIENZA MATEMATICA IN UNA STRAORDINARIA OPERA DI 10 DVD.

Le Scienze presenta una collana per accompagnarci sulle orme dei grandi pensatori che si sono dedicati alla forma più pura ed elevata del pensiero umano: la matematica. Da Pitagora ad Euclide, da Newton ad Einstein: tutte le tappe che portano al confine del sapere, in cui la scienza incontra la filosofia.



IN EDICOLA IL 1° DVD CON **Le Scienze**

BIODIVERSITÀ

L'antica impronta umana sull'Amazzonia

L'attuale vegetazione della foresta è in parte un retaggio delle popolazioni precolombiane



L'inaccessibilità della foresta amazzonica ha storicamente ostacolato la ricerca archeologica, dando l'impressione di un ambiente vergine. Tuttavia, essa non è una vasta distesa di natura incontaminata ma una foresta la cui biodiversità è stata plasmata nel corso dei secoli dalle popolazioni precolombiane. A sostenerlo è uno studio pubblicato su «Science» da una collaborazione di un centinaio di ecologi coordinati dall'Istituto nazionale di ricerca dell'Amazzonia.

I ricercatori hanno sovrapposto l'ubicazione degli oltre 1000 censimenti forestali presenti nel database Amazon Tree Diversity Network a una mappa di più di 3000 siti archeologici dell'Amazzonia. Lo studio si è focalizzato su 85 specie domestiche dagli indigeni nell'ultimo millennio per ricavarne cibo, riparo o per altri usi.

Nonostante il ridotto numero di specie considerate, lo studio ha evidenziato la profonda impronta dell'uomo nella composizione della foresta. In tutto il bacino amazzonico la ricorrenza di specie addomesticate è risultata cinque volte maggiore rispetto alle specie selvatiche che for-

mano le foreste mature. Nella maggioranza dei casi, la diffusione è direttamente correlata alla vicinanza ai siti archeologici, attorno ai quali la loro diversità è massima.

«Per molto tempo gli studi ecologici hanno ignorato l'influenza dei popoli precolombiani sulle foreste», spiega Carolina Levis, prima autrice dello studio. «Le specie domestiche sono di vitale importanza per il sostentamento e l'economia dei popoli amazzonici. L'attuale vegetazione è in parte un retaggio dei suoi antichi abitanti». E il loro contributo potrebbe essere ancora più rilevante, dal momento che le popolazioni precolombiane facevano affidamento su centinaia di altre specie arboree non considerate nello studio.

Colmare questa lacuna potrebbe avere notevoli implicazioni per i progetti di conservazione. Degrado e deforestazione minacciano infatti la cultura e la sopravvivenza dei popoli precolombiani, tuttora dipendenti da queste specie domestiche dai loro antenati.

Davide Michielin

Come una pianta diventa carnivora

Un'analisi genetica di diverse piante carnivore ha fatto luce sull'evoluzione di questi vegetali, la cui insolita capacità colpì Darwin a tal punto che dedicò loro il saggio *Piante insettivore*. Questi vegetali appaiono su suoli poveri di azoto e fosforo: assorbire nutrienti dagli insetti compensa questa carenza e rappresenta un vantaggio evolutivo, ma i meccanismi genetici di questo comportamento non erano chiari.

L'ultimo studio, pubblicato su «Nature Ecology & Evolution» dall'Istituto nazionale di biologia fondamentale del Giappone, presenta la sequenza di *Cephalotus follicularis*, una pianta australiana in cui le foglie insettivore e quelle normali sono chiaramente differenziate. Le differenze nel DNA dei due tipi di foglie permettono di identificare un gruppo di geni, originariamente dedicati alla difesa da certe malattie, la cui espressione cambia nelle foglie carnivore, conferendo alla pianta la capacità di digerire animali.

Il confronto con altre piante carnivore suggerisce che lo stesso cambiamento sia accaduto in modo indipendente in specie diverse. Anche se le piante hanno diverse strategie, a livello molecolare si è verificata un'evoluzione parallela, o convergenza evolutiva, che ha interessato sempre le stesse molecole.

Michele Catanzaro

BIOLOGIA

La proteina che accomuna sesso e virus

Si chiama HAP2 ed è coinvolta nei meccanismi di fusione delle membrane cellulari

La natura è parsimoniosa. E quando trova la soluzione a un problema la mette in pratica ogni volta che il problema si ripresenta, anche se riguarda cose differenti. Così si chiude l'articolo pubblicato su «Cell» da un gruppo coordinato da Juliette Fédry, dell'Istituto Pasteur, in cui si parla dell'inaspettata affinità tra riproduzione sessuale e infezioni virali. I due processi hanno infatti in comune una proteina che risolve il problema della fusione delle membrane cellulari permettendo l'unione dei gameti nella riproduzione sessuale e l'ingresso dei patogeni nelle cellule ospiti nelle infezioni virali.

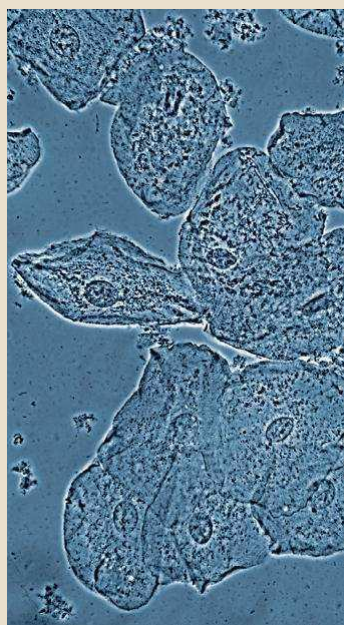
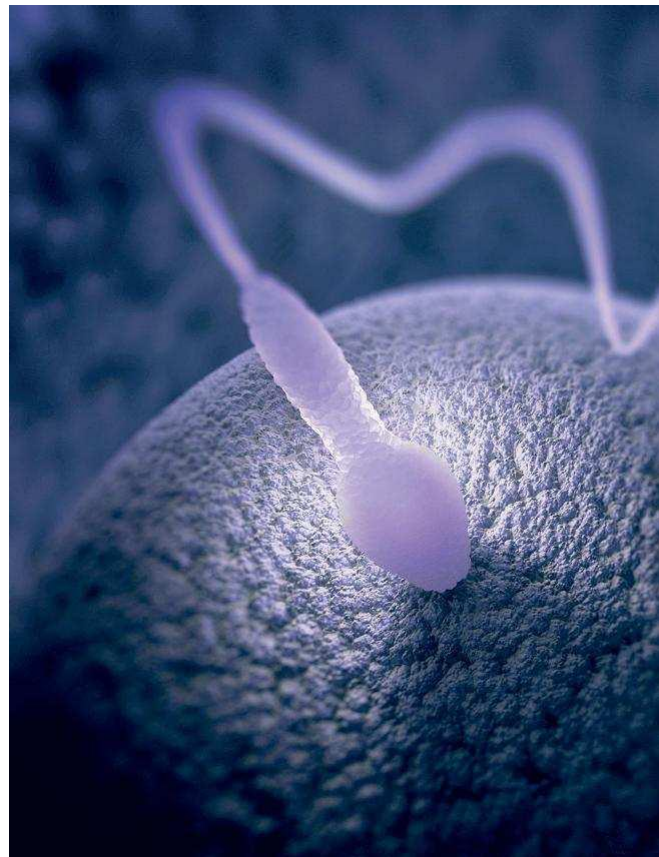
Lo studio è partito dall'alga unicellulare *Chlamydomonas reinhardtii*: screening genetici avevano già individuato nella proteina HAP2, sintetizzata dall'omonimo gene, una possibile candidata per la fusione dei gameti. Per meglio comprendere l'azione di HAP2, i ricercatori ne hanno analizzato sequenza amminoacidica e struttura con la cristallografia a raggi X, scoprendo un'incredibile somiglianza con le proteine di fusione di membrana presenti in virus come Zika e dengue,

soprattutto in una regione chiamata «laccio di fusione». Bloccando questa regione con un anticorpo o cambiando anche un singolo amminoacido, la fusione dei gameti dell'alga non andava a buon fine, la prova che il laccio di HAP2 è la chiave del processo.

La scoperta potrebbe aiutare la lotta alla malaria, causata dai protozoi del genere *Plasmodium*, che si riproducono sessualmente nello stomaco delle zanzare che li veicolano agli uomini. Mettendo fuori uso HAP2 si impedirebbero fusione dei gameti, riproduzione e diffusione del protozoo. In attesa di sperimentare il metodo, si possono trarre le conclusioni che riportano alle prime righe.

La presenza della proteina in virus ed eucarioti suggerisce che sia comparsa milioni di anni fa in un progenitore comune e poi trasmessa ai diversi organismi secondo un meccanismo di trasmissione genetica orizzontale, cioè non legato alla riproduzione. Ed ecco la parsimonia della natura: non si reinventa quello che si è già trovato e che funziona bene.

Martina Saporiti



Un equilibrato ricambio cellulare

Gli organi sono «impacchettati» dall'epitelio, un tessuto soggetto a un veloce ricambio per sostituire cellule morte o difettose. Per evitare che a fronte delle cellule eliminate se ne producano troppe o troppo poche, l'evoluzione ha inventato un «controllore»: Piezo 1, una proteina che regola sia l'eliminazione sia la divisione cellulare, assicurando la normale densità del tessuto: se l'epitelio ha poche cellule, infatti, viene meno la sua funzione protettiva e cresce il rischio di malattie infiammatorie; ma se le cellule epiteliali si moltiplicano troppo c'è il rischio di tumori. Anni fa Jody Rosenblatt, dell'Università dello Utah, aveva dimostrato che Piezo 1 «sente» se nell'epitelio ci sono cellule in eccesso provvedendo a eliminarle. In un nuovo studio pubblicato su «Nature», un team coordinato da Rosenblatt ha scoperto che la proteina controlla anche il processo inverso, cioè si accorge se nel tessuto epiteliale ci sono «buchi» e innescando divisioni cellulari per riempirli. Piezo 1 rileva il sovraffollamento o la scarsità delle cellule epiteliali attraverso le sollecitazioni meccaniche a cui è soggetta la cellula in cui si trova, nel primo caso uno schiacciamento e nel secondo uno stiramento.

I ricercatori hanno «stirato» cellule umane, di cane e di pesce zebra per replicare le condizioni di un epitelio con poche cellule: lo stiramento metteva in azione Piezo 1, che lasciava entrare ioni calcio nelle cellule; l'incremento nella concentrazione degli ioni promuoveva la fosforilazione di una seconda proteina, che a sua volta innescava l'espressione della ciclina B, che dà il via alla mitosi. La capacità di Piezo 1 di rilevare tensioni opposte potrebbe dipendere dalla sua localizzazione nella cellula: si può trovare sia sulla membrana cellulare e del reticolo endoplasmatico sia in aggregati citoplasmatici; nel primo caso rilevarebbe lo stiramento, nel secondo lo schiacciamento.

Martina Saporiti

I vantaggi dell'appendice



L'appendice è da sempre considerata una vestigia della nostra specie, perché si pensa abbia perso del tutto la sua funzionalità originale: contenere batteri che digeriscono la cellulosa presente nelle piante. Ma secondo uno studio pubblicato su «Comptes Rendus Palevol», l'appendice potrebbe essersi conservata nel corso dell'evoluzione perché i batteri contenuti al suo interno hanno ancora un ruolo e potrebbero aiutare il sistema immunitario a combattere le infezioni. Dopo aver raccolto i dati sullo sviluppo dell'appendice in 533 specie di mammiferi vissute negli ultimi 11 milioni di anni, gli autori hanno scoperto che l'organo si è evoluto in modo indipendente in diverse specie. Inoltre, sembra che l'appendice sia riuscita a «sopravvivere» per più di 29 volte nel corso delle ramificazioni che hanno caratterizzato la filogenesi dei mammiferi, mentre è stata persa solo 12 volte. Il team diretto da Heather Smith, della Midwestern University, che ha condotto lo studio, ipotizza quindi uno scopo adattativo dell'organo. La presenza di un'alta concentrazione di tessuto linfoide intorno all'appendice, e i risultati di alcuni studi precedenti, poi, sono indizi che ne suggeriscono un ruolo nel favorire la crescita di batteri intestinali benefici. (MaMa)

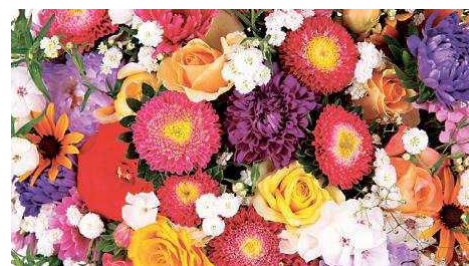
Il guscio solido della giovane Terra

Un guscio unico, solido e uniforme: secondo uno studio pubblicato su «Nature» da ricercatori della Curtin University di Perth e dell'Università del Maryland, questo era l'aspetto della Terra prima che la litosfera iniziasse a frammentarsi. La genesi della litosfera è tuttora poco compresa: secondo alcuni le placche esistono fin dal raffreddamento della superficie del pianeta mentre altri sostengono che si siano formate in seguito.

Gli autori hanno analizzato alcuni graniti e basalti provenienti dalle formazioni di Pilbara e Coucal, in Australia. Le rocce di queste formazioni, tra le più antiche di quelle note, hanno composizione chimica simile, indizio della probabile origine dei graniti di Pilbara, nati dalla subduzione dei basalti di Coucal. I graniti si formano infatti nelle zone in cui la crosta oceanica, composta prevalentemente da basalto, scivola sotto quella continentale, fondendo. Partendo dalla composizione delle due rocce, i ricercatori hanno elaborato alcuni modelli termodinamici per riprodurre le condizioni che avrebbero potuto portare le rocce basaltiche di Coucal a formare i graniti di Pilbara, scoprendo che la pressione non corrisponde a quella dei processi di subduzione.

I graniti si sarebbero formati in condizione di bassa pressione, sotto un ampio e uniforme strato di crosta sovrastante. (DaMi)

L'origine dei fiori



Darwin definì l'origine delle piante da fiore un «abominevole mistero» dell'evoluzione. Mentre le altre piante hanno colonizzato la Terra da 400 milioni di anni, infatti, quelle fiorifere sono apparse «solo» da 150. Le loro antenate sono le gimnosperme, il cui metodo riproduttivo è molto rudimentale.

Uno studio dell'Université de Grenoble-Alpes, pubblicato su «New Phytologist», ha ora svelato una parte significativa di questo enigma, individuando i fattori genetici che legano le primitive angiosperme alle piante da fiore, in cui petali e sepali contengono entrambi gli organi maschili e femminili. Gli scienziati hanno scoperto che nella gimnosperma *Welwitschia mirabilis* sono presenti polline e alcuni ovuli sterili che possono dunque essere considerati una sorta di «anello mancante» nell'evoluzione delle piante da fiore.

L'ipotesi è confermata anche dal fatto che sono stati trovati geni analoghi a quelli che determinano la formazione dei petali. (MaSe)

Un adattamento rapido contro l'arsenico

Quel che non ti uccide ti fa evolvere. E sembra che sia andata proprio così per le popolazioni dell'area di Quebrada Camarones, nel deserto di Atacama, nel nord del Cile, noto come il deserto non polare più arido al mondo, e in cui le scarse risorse idriche presentano livelli altissimi di arsenico: oltre 100 volte il limite stabilito come sicuro dall'Organizzazione mondiale della Sanità. L'arsenico provoca danni molto seri alla salute, tra cui aborti spontanei, eppure la popolazione che si è insediata nell'area 7000 anni fa è sopravvissuta per tutto questo tempo. Mario Apatá, dell'Università di Santiago del Cile, sospettava che la forte pressione selettiva esercitata dall'arsenico avesse fatto evolvere, in tempi relativamente brevi, una protezione genetica legata a un enzima, AS3MT, che metabolizza la tossina. E così hanno confermato i dati: l'analisi genetica di 150 individui provenienti da tre aree del Cile dimostra che il 68 per cento degli abitanti di Camarones e il 48 per cento degli abitanti della Valle de Azapa reca la variante protettiva dell'enzima, rilevata invece solo nell'8 per cento della popolazione di un'area più meridionale. L'osservazione supporta l'ipotesi dell'adattamento all'ambiente avverso. La ricerca è stata pubblicata su «American Journal of Physical Anthropology». (FeSg)



Vonschontagen/Stockphoto (appendicite), Belchonock/Stockphoto (fiori), Hermes Images / AGF (villaggio Atacama)

Le prime uova di trilobiti



Sono stati rinvenuti molti trilobiti eccezionalmente conservati, ma la loro riproduzione è sempre rimasta un mistero, perché nessuno aveva mai ritrovato uova o organi riproduttivi. Ora però uno studio pubblicato su «Geology» descrive per la prima volta le uova di questi artropodi primitivi, che risalgono al periodo Ordoviciano, intorno a 450 milioni di anni fa.

Il fossile rivelatore proviene dal Gruppo Lorena, un giacimento nello Stato di New York famoso per i suoi trilobiti piritizzati. Oltre ai minimi dettagli dell'esoscheletro, si sono conservate masserelle di uova tondeggianti ed ellittiche, trasformate in piritite, di circa 200 micrometri di diametro. La posizione suggerisce che le uova non fecondate fossero rilasciate dagli ovari all'interno della testa, come fanno ancora oggi le femmine dei limuli. Da qui fuoriuscivano da un poro genitale non ancora individuato, che nei maschi rilasciava sperma. I primi artropodi, quindi, dovevano avere una fecondazione esterna. (EuMe)

Benvenuti nell'Antropocene

In attesa che l'iter presso la Commissione internazionale di stratigrafia segua il suo corso, si moltiplicano gli studi per raccogliere prove a sostegno dell'introduzione dell'Antropocene nella scala dei tempi geologici.

Dalla sua comparsa, l'uomo ha alterato profondamente l'ambiente, lasciando una traccia indelebile nella storia del pianeta. Un intervallo di tempo breve in termini geologici, i cui confini sono perciò di difficile individuazione. Un'estesa rassegna pubblicata su «American Mineralogist» da un gruppo di ricerca guidato da Robert Hazen della Carnegie Institution for Science, enfatizza il ruolo della rivoluzione industriale nella diversificazione dei minerali. Sulla Terra esistono oltre 5200 specie minerali, 208 delle quali originate dall'azione più o meno diretta dell'uomo negli ultimi tre secoli. La maggioranza è attribuibile all'estrazione mineraria: alterazione chimica degli scarti di lavorazione, incrostazioni nelle pareti dei tunnel o nei bacini di lagunaggio, detonazioni e incendi.

Secondo gli autori, l'azione dell'uomo è il più importante evento di diversificazione e di distribuzione dei minerali dopo la Grande Ossidazione, l'accumulo di ossigeno atmosferico avvenuto 2 miliardi di anni fa che diede origine a circa due terzi dei minerali conosciuti. (DaMi)

I litigi infiniti dei bot

Il web può diventare teatro di conflitti invisibili, lunghi anche anni, combattuti dai bot, software automatici che controllano e correggono i contenuti, ricercano dati o verificano infrazioni dei copyright. Un team dell'Università di Oxford e dell'Alan Turing Institute, nel Regno Unito, ha analizzato i software che sovrintendono alla gestione di Wikipedia in 13 lingue del mondo. Lo studio, pubblicato su «PLOS One», rivela una fitta rete di interazioni tra bot, alcune volute, altre impreviste, che



si traducono anche in azioni contrastanti: quello che viene corretto da un bot viene modificato da un altro, fino a provocare anche un blocco del sistema o una modifica dei contenuti originali. Questo avviene soprattutto nelle edizioni di Wikipedia in lingue meno diffuse: in dieci anni, per esempio, nell'edizione tedesca sono stati riscontrati 24 conflitti, in quella polacca 105.

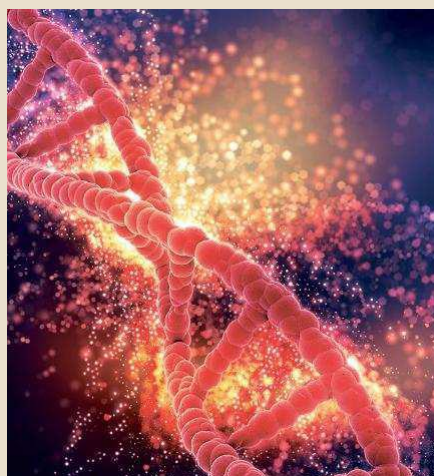
I contrasti rispecchiano le diverse culture degli sviluppatori dei bot. Secondo gli autori, la ricerca mette in guardia su conflitti simili che si potrebbero verificare in altre applicazioni, come le auto a guida autonoma o la cybersecurity, con esiti potenzialmente dannosi. La soluzione? Definire al più presto regole di programmazione universali. (RiOl)

Un sequenziamento di massa per i genomi della Terra

Sequenziare il genoma di ogni specie vivente sulla Terra, iniziando dagli eucarioti. È l'obiettivo dell'Earth BioGenome Project, annunciato a Washington al convegno BioGenomics2017, organizzato dallo Smithsonian National Museum of Natural History. È un progetto ambizioso, e ovviamente di lungo periodo, ma è promosso da partecipanti di rilievo come John Kress, direttore di uno dei programmi dello Smithsonian, ed è appoggiato da colossi del ramo come il Wellcome Trust Sanger Institute britannico.

Il piano prevede di partire realizzando sequenze genomiche di alta qualità per un esponente di ciascuna delle 9000 famiglie di eucarioti, che faranno da genomi di riferimento. Poi si passerà a sequenze più grossolane per tutti i generi e infine per il milione e mezzo di specie restanti, da affinare all'occorrenza.

I proponenti confidano nell'esperienza del Progetto genoma umano, proposto quando non era neanche tecnicamente fattibile, ma che ha prodotto innovazioni tecnologiche e un crollo dei costi tale che ora una società promette, entro un anno, di sequenziare un genoma eucariotico a 100 dollari. Con la stessa



logica, e poggiando sui tanti progetti già in corso di sequenziamento di massa di vertebrati, artropodi e altri gruppi, i costi finali per tutti gli eucarioti dovrebbero essere simili a quelli affrontati per il genoma umano. (GiSa)

COSMOLOGIA

L'universo fa **BOOM**

Le più recenti misurazioni astrofisiche, insieme ad alcuni problemi teorici, mettono in dubbio l'amata teoria dell'inflazione sul cosmo delle origini e suggeriscono la necessità di idee nuove

di Anna Ijjas, Paul J. Steinhardt e Abraham Loeb

IN BREVE

Le più recenti misurazioni del fondo cosmico a microonde (CMB), la più antica luce dell'universo, sollevano dubbi sulla teoria inflazionaria del cosmo, l'idea che lo

spazio si espande esponenzialmente nei primi attimi del tempo.

L'inflazione dovrebbe produrre una diversa distribuzione delle variazioni di temperatura nella CMB

(anche se la si può modificare in modo che preveda qualsiasi esito) e genererebbe anche onde gravitazionali primordiali, che non sono state osservate.

I dati fanno ritenere che i cosmologi debbano riesaminare questo paradigma così apprezzato e considerare nuove idee sulle origini dell'universo.



Anna Ijjas ha la posizione post-doc John A. Wheeler presso il Princeton Center for Theoretical Science. Studia l'origine, l'evoluzione e il futuro dell'universo e la natura della materia oscura e dell'energia oscura.



Paul J. Steinhardt è Albert Einstein Professor di scienze alla Princeton University e direttore del Princeton Center for Theoretical Science. Le sue ricerche spaziano fra problemi di fisica delle particelle, astrofisica, cosmologia e fisica della materia condensata.



Abraham Loeb dirige il Dipartimento di astronomia della Harvard University, è tra i fondatori della Black Hole Initiative di Harvard e dirige l'Institute for Theory and Computation all'Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics.



Il 21 marzo 2013 l'Agenzia spaziale europea ha tenuto una conferenza stampa per annunciare i nuovi risultati ottenuti dal satellite Planck. La sonda aveva mappato in modo più dettagliato che mai la radiazione cosmica di fondo a microonde (CMB, da *cosmic microwave background*), emessa più di 13 miliardi di anni fa, subito dopo il big bang. La nuova mappa, come hanno spiegato gli scienziati a una platea di giornalisti, conferma una teoria cara ai cosmologi da 35 anni: che l'universo ebbe inizio con un'«esplosione» seguita da un breve periodo di espansione iperaccelerata detta inflazione. Questa espansione rese l'universo omogeneo a tal punto che, a distanza di miliardi di anni, rimane quasi uniforme per tutto lo spazio e in ogni direzione, nonché «piatto» – cioè privo della curvatura che ha per esempio una sfera – tranne per minuscole variazioni nella concentrazione della materia che corrispondono alla complessa gerarchia di stelle, galassie e ammassi di galassie che ci circondano.

Il messaggio principale della conferenza stampa era che i dati di Planck combaciavano perfettamente con le previsioni dei più semplici modelli inflazionari, rafforzando così l'impressione che la teoria fosse saldamente confermata. Il grande libro della cosmologia sembrava essere concluso, suggerivano i ricercatori.

In seguito all'annuncio, noi tre ne abbiamo discusso le conseguenze allo Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. All'epoca Ijjas era una studentessa di dottorato in visita dalla Germania; Steinhardt, che una trentina d'anni prima era stato uno degli artefici della teoria dell'inflazione ma il cui lavoro successivo ne aveva segnalato seri problemi nelle basi teoriche, trascorreva un anno sabbatico ad Harvard; Loeb era il padrone di casa, in qualità di direttore del Dipartimento di astronomia. Avevamo apprezzato le precise osservazioni del gruppo di Planck, ma discordavamo con la loro interpretazione. Semmai i dati di Planck addirittura smentivano i modelli più semplici di inflazione e aggravavano i problemi teorici esistenti, fornendo nuovi motivi per considerare idee alternative su origini ed evoluzione dell'universo.

Negli anni trascorsi da allora, questa posizione è stata ulteriormente rafforzata dai nuovi dati più precisi raccolti dal satellite Planck e da altri strumenti. Ma la comunità cosmologica non ha ancora affrontato seriamente la teoria inflazionaria del big bang, né considerato con la giusta attenzione chi mette in dubbio che l'inflazione si sia verificata. I cosmologi sembrano invece accettare senza problemi la posizione secondo cui dovremmo accettare

la teoria dell'inflazione, perché offre l'unica spiegazione semplice delle caratteristiche osservate dell'universo. Come spiegheremo, però, i dati di Planck, unitamente ai problemi teorici, hanno scosso fino alle fondamenta questa asserzione.

Ascoltiamo l'oracolo

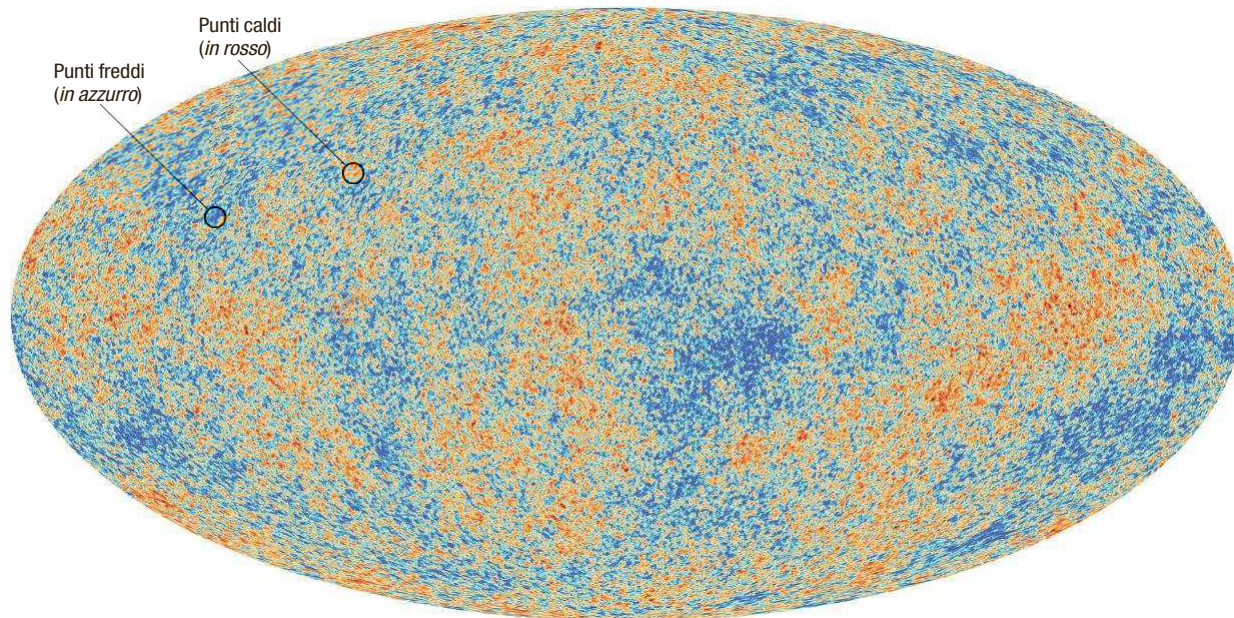
Per capire i problemi dell'inflazione, cominciamo adeguandoci al proclama dei suoi proponenti: assumiamo che sia vera. Immaginiamo che un oracolo riconosciuto ci informi che sicuramente, poco dopo il big bang, si verificò l'inflazione. Se accettiamo la dichiarazione dell'oracolo, che cosa ci dice sull'evoluzione dell'universo? Se l'inflazione ci offrisse davvero una spiegazione semplice dell'universo, l'affermazione dell'oracolo ci dovrebbe dire molto su che cosa ci possiamo aspettare dai dati di Planck.

Una delle cose che ci direbbe è che in qualche momento di poco successivo al big bang ci dovette essere una minuscola zona di spazio piena di una forma esotica di energia che scatenò un periodo di espansione in rapida accelerazione (l'inflazione) di questa zona. La maggior parte delle forme di energia, come quella contenuta nella materia e nella radiazione, si oppone all'espansione dell'universo e la rallenta per via dell'attrazione gravitazionale. L'inflazione richiede che l'universo sia pieno di un'alta densità di energia che si repelle gravitazionalmente, incrementando così l'espansione e rendendola ancora più rapida. È però importante osservare che questo ingrediente indispensabile, detto energia

Un'istantanea dell'universo neonato

Questa mappa, ottenuta grazie al satellite Planck dell'Agenzia spaziale europea (ESA), mostra la radiazione cosmica a microonde (CMB), la più antica luce osservabile dell'universo, che offre la miglior immagine che abbiamo del cosmo appena nato. Le aree azzurre del cielo rappresentano punti in cui la temperatura della CMB, e quindi dell'universo delle origini, era più bassa, mentre le regioni rosse corrispondono a zone più calde. Secondo i proponenti dell'inflazione, teoria per cui il cosmo si sarebbe espanso rapidamente nei

suoi primi istanti, la distribuzione dei punti caldi e freddi è coerente con questa idea. Ma in realtà la teoria può produrre qualsiasi distribuzione, e per lo più genera una variazione di temperature maggiore di quella che appare qui. Inoltre, se si fosse verificata l'inflazione, la CMB dovrebbe contenere le prove di onde gravitazionali cosmiche, increspature dello spazio-tempo provocate dalla dilatazione iniziale, ma non ce ne sono. I dati di Planck mostrano invece che la vera storia del cosmo è ancora da scrivere.



inflazionaria, è ipotetico; non abbiamo prova diretta che esista, e anzi nel corso degli ultimi 35 anni sono state avanzate letteralmente centinaia di ipotesi su che cosa possa essere questa energia inflazionaria, ognuna delle quali genererebbe ritmi di inflazione e quantità complessive di accrescimento molto diversi. È quindi chiaro che l'inflazione non è una teoria precisa, ma uno schema concettuale flessibile che comprende svariate possibilità.

Ma che cosa potrebbe dirci l'affermazione dell'oracolo che risulti vero per tutti i modelli, indipendentemente dal tipo specifico di energia inflazionaria? Intanto, quello che sappiamo dalla meccanica quantistica ci assicura che temperatura e densità della materia nell'universo alla fine dell'inflazione devono variare in qualche misura da un punto all'altro. Le fluttuazioni quantistiche casuali della concentrazione dell'energia inflazionaria su scala subatomica si dilaterebbero durante l'inflazione fino a diventare regioni di dimensioni cosmiche con quantità diverse di questa energia. Secondo la teoria, l'espansione accelerata si conclude quando l'energia inflazionaria decade in materia e radiazione ordinarie.

Nei punti in cui la densità di energia inflazionaria (la sua quantità per metro cubo) è lievemente più grande, l'espansione accelerata durerebbe appena di più e, quando alla fine decade, densità e temperatura dell'universo sarebbero lievemente più alte. Le variazioni quantistiche dell'energia inflazionaria si tradurrebbero quindi in una struttura di punti un poco più caldi o più freddi nel fondo cosmico a microonde, che conserverebbe così una traccia di

quei primi tempi. Nel corso dei successivi 13,7 miliardi di anni le minime variazioni di densità e temperatura del cosmo si sarebbero condensate sotto l'azione della gravità, fino a formare le galassie e le altre strutture su larga scala.

È un buon inizio, ma piuttosto vago. È possibile prevedere il numero e la disposizione delle galassie nello spazio? O in che misura lo spazio è curvo e distorto? La quantità di materia, o di altre forme di energia, da cui è composto l'universo attuale? La risposta è no: l'inflazione è un'idea così flessibile che è possibile qualunque esito finale. L'inflazione ci dice almeno perché si verificò il big bang o come la regione di spazio creata inizialmente si evolvette via via fino a diventare l'universo che osserviamo oggi? Ancora una volta la risposta è no.

Anche ammettendo di sapere che l'inflazione è vera, non potremmo prevedere molto sui punti caldi e freddi osservati dal satellite Planck. La mappa ottenuta da Planck e gli studi precedenti sulla CMB indicano che la distribuzione delle zone più o meno calde è quasi uguale indipendentemente da quanto «zoomiamo», vale cioè la cosiddetta proprietà dell'invarianza di scala. I più recenti dati di Planck mostrano che la deviazione da un'invarianza di scala perfetta è minuscola, di appena qualche punto percentuale, e che la variazione media di temperatura fra tutti i punti è circa dello 0,01 per cento. I proponenti dell'inflazione sottolineano spesso che è possibile ottenere una struttura con queste proprietà, ma queste affermazioni trascurano un aspetto fondamentale: l'in-

flazione ammette molte altre strutture di punti caldi e freddi che non sono quasi invarianti rispetto alla scala e che in genere hanno una variazione di temperatura molto maggiore del valore osservato. In altre parole, l'invarianza di scala è possibile, ma lo è anche una grande deviazione da questa invarianza e tutto quello che c'è in mezzo, a seconda dei dettagli della densità di energia inflazionaria che assumiamo. Quindi la distribuzione osservata da Planck non si può prendere come conferma dell'inflazione.

In particolare, se assumiamo che si verificò l'inflazione, c'è una caratteristica che potremmo essere quasi sicuri di rilevare nelle osservazioni di Planck sulla CMB, perché comune a tutte le forme più semplici di energia inflazionaria, comprese quelle presentate nei libri di testo. Mentre producono variazioni casuali nell'energia inflazionaria, generano anche deformazioni casuali nello spazio, che si propagano nell'universo come onde di distorsione spaziale dopo la fine dell'inflazione. Queste perturbazioni, dette onde gravitazionali, sono un'altra fonte di punti caldi e freddi della CMB, ma con un distintivo effetto polarizzante (fanno sì cioè che la luce abbia un certo orientamento preferenziale per il proprio campo elettrico, a seconda se proviene da un punto caldo, freddo o una via di mezzo).

Purtroppo la ricerca delle onde gravitazionali inflazionarie non ha avuto successo. Sebbene i cosmologi abbiano osservato i punti caldi e freddi con il satellite COBE (COsmic Background Explorer) fin dal 1992 e con molti esperimenti successivi, compresi i risultati ancora più recenti di Planck del 2015, al momento in cui scriviamo non hanno trovato tracce delle onde gravitazionali cosmiche che ci aspettiamo dall'inflazione, nonostante le accurate ricerche. (Il 17 marzo 2014 i ricercatori dell'esperimento BICEP2 al Polo Sud avevano annunciato la rilevazione di onde gravitazionali cosmiche, ma poi hanno ritrattato le loro dichiarazioni quando hanno capito che in realtà avevano osservato un effetto di polarizzazione provocato dei granelli di polvere nella Via Lattea.) Si noti che queste previste onde gravitazionali cosmiche non hanno niente a che vedere con le onde gravitazionali generate dalla collisione di buchi neri nell'universo moderno rilevate dal Laser Interferometer Gravitational wave Observatory (LIGO) nel 2015.

I risultati del satellite Planck – che uniscono una deviazione inaspettatamente piccola (pochi punti percentuali) dalla perfetta invarianza di scala nella distribuzione dei punti caldi e freddi nella CMB e il fallimento nell'osservare onde gravitazionali cosmiche – sono stupefacenti. Per la prima volta da più di trent'anni i modelli inflazionari più semplici, compresi quelli che si trovano in tutti i libri di testo, sono fortemente in contrasto con le osservazioni. Ovviamente i teorici si sono affrettati a rattoppare la teoria inflazionaria, a costo di creare modelli arcani di energia inflazionaria e di far emergere ulteriori problemi.

Piste da sci

Per cogliere appieno l'impatto delle misurazioni di Planck, è d'aiuto guardare da vicino i modelli inflazionari proposti, con tutti i loro difetti.

Si ritiene che l'energia inflazionaria derivi da un ipotetico cam-

po, l'inflatone, analogo a un campo elettrico, che pervade lo spazio e ha una certa intensità in ogni punto. Dato che l'inflatone è ipotetico, gli studiosi sono liberi di immaginare che provochi una repulsione gravitazionale, così da far accelerare l'espansione dell'universo. L'intensità dell'inflatone in un dato punto dello spazio determina la densità dell'energia inflazionaria in quel punto. Il rapporto fra intensità del campo e densità di energia si può rappresentare con una curva su un grafico che ha l'aspetto di un pendio (si veda il box nella pagina a fronte). Tra le centinaia di modelli di energia inflazionaria che sono stati proposti finora, ognuno dà una forma precisa a questo pendio che determina le proprietà dell'universo dopo la fine dell'inflazione; per esempio, se l'universo è piatto e uniforme o no, e se ha o non ha variazioni di temperatura e densità quasi invarianti per scala.

Dalla pubblicazione dei dati di Planck i cosmologi si trovano in una situazione molto simile alla seguente: immaginiamo di vivere in una cittadina isolata in fondo a una valle formata da due montagne. Finora conosciamo soltanto gli altri residenti della cittadina, ma un giorno appare una forestiera. Tutti vogliono sapere come sia arrivata in città: consultiamo il pettegolo del luogo (il nostro oracolo), che afferma di sapere che la forestiera è arrivata qui sciando. Se ci crediamo, ragioniamo sul fatto che ci sono solo due montagne che scendono alla valle.

Chiunque legga una guida turistica conosce la prima montagna, facilmente raggiungibile con uno ski-lift. Tutte le piste hanno una pendenza ragionevole, e visibilità e condizioni della neve sono in gene-

re buone. La seconda montagna è un altro paio di maniche: non è riportata nelle normali guide per gli sciatori, e non c'è da meravigliarsene, perché il suo versante è noto per le valanghe. L'unico accesso alla nostra cittadina è molto arduo perché comincia su una cresta piatta che finisce con un ripido dirupo, e inoltre non c'è nessuno ski-lift. L'unico modo concepibile per cominciare una discesa con gli sci qui consiste nel lanciarsi da un elicottero e, usando un paracadute, toccare il suolo in un punto preciso al centimetro della cresta, esattamente con la velocità giusta; il minimo errore porterebbe lo sciatore verso una valle lontana o lo lascerebbe immobile in cima. Nel peggiore dei casi potrebbe cominciare una valanga prima che lo sciatore raggiunga il crinale, e così non sopravviverebbe. Se il pettegolo del paese ha ragione e la forestiera è arrivata sugli sci, è ragionevole concludere che proveniva dalla prima montagna.

Sarebbe folle pensare che qualcuno segua la seconda strada, perché le probabilità di raggiungere la città sono infinitesime a confronto con la discesa dalla prima montagna. Ma poi notiamo un particolare della forestiera: non ha, attaccato alla giacca, il biglietto dello ski-lift. In base a questa osservazione e alla convinzione del pettegolo che la forestiera sia arrivata sciando, siamo costretti alla bizzarra conclusione che venga dalla seconda montagna. O magari non è arrivata sciando, e dobbiamo mettere in dubbio l'affidabilità del pettegolo.

Analogamente, se un presunto oracolo ci informasse che l'universo fosse arrivato alle condizioni attuali grazie all'inflazione, ci aspetteremmo una curva della densità di energia inflazionaria co-

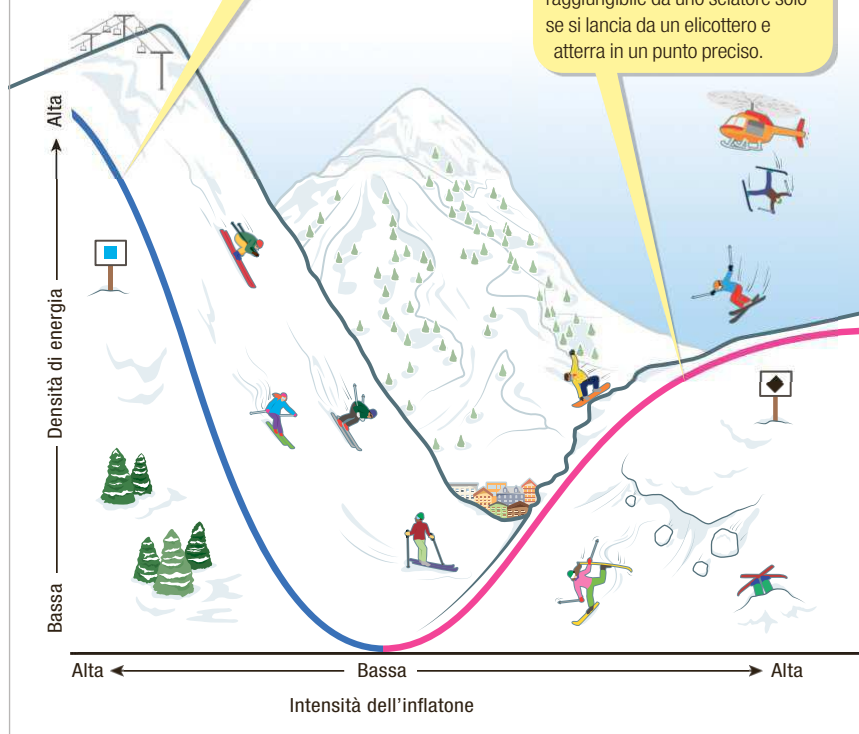
I modelli inflazionari più semplici, compresi quelli che si trovano in tutti i libri di testo, sono fortemente in contrasto con le osservazioni. Ovviamente i teorici si sono affrettati a rattoppare la teoria inflazionaria, a costo di creare modelli arcani

L'inflazione come una pista da sci

Se l'inflazione in effetti è avvenuta, allora deve essere stata scatenata da un'ipotetica «energia inflazionaria», provocata da un campo detto «inflatone» che avrebbe permeato lo spazio. Versioni diverse dell'inflazione propongono rapporti diversi fra intensità del campo e densità di energia inflazionaria. Sono qui mostrati i grafici di due possibili funzioni che collegano queste grandezze. Una (*in blu, a sinistra*) è simile al tradizionale modello dell'inflazione da libro di testo; l'altra (*in rosa, a destra*) richiede condizioni iniziali molto specifiche e sembra quindi inverosimile. Questa analogia con due discese sciistiche fa intuire perché la seconda classe di modelli – il tipo di inflazione che non è stato escluso dai dati recenti – è difficile da accettare.

Questa discesa regolare, corrispondente a un rapido incremento della densità di energia e ai modelli tradizionali di inflazione, somiglia a un pendio su cui è agevole sciare. I modelli tracciano un quadro plausibile per il possibile inizio dell'inflazione, perché cominciano con l'energia inflazionaria a una soglia sensata (un punto di partenza definito da uno ski-lift) ed evolvono in modo regolare e prevedibile (una pista senza ostacoli), ma sono in conflitto con gli ultimi dati astrofisici.

Questa versione della teoria, detta modelli di plateau, richiede circostanze molto improbabili affinché si avvii l'inflazione: l'inflatone dovrebbe assumere un valore preciso in un momento preciso. Questi modelli sono corrispondenti a un versante in cui sono frequenti le valanghe e raggiungibile da uno sciatore solo se si lancia da un elicottero e atterra in un punto preciso.



me quella descritta dai libri di testo, perché ha una forma semplice da cima a fondo, meno parametri da tarare e condizioni meno delicate perché parta l'inflazione. Anzi, finora quasi tutti testi di cosmologia inflazionaria hanno presentato curve di energia di questo tipo: la densità di energia cresce regolarmente al variare dell'intensità del campo, in modo che sia possibile trovare un valore iniziale dell'inflatone per cui la densità dell'energia sia pari a un numero detto densità di Planck (10^{120} volte maggiore della densità odierna), la densità di energia totale disponibile nel momento in cui l'universo emerge dal big bang.

Con questa vantaggiosa condizione iniziale in cui l'unica forma di energia è inflazionaria, comincerebbe subito l'espansione accelerata. Durante l'inflazione, l'intensità dell'inflatone evolverebbe in modo naturale, e quindi la densità di energia diminuirebbe lentamente e regolarmente seguendo la curva fino a valle, dove raggiunge un minimo corrispondente all'universo in cui viviamo oggi. (Possiamo considerare questo svolgersi degli eventi come se l'inflatone «sciasse» giù per la curva.) Questa è la classica storia dell'inflazione presentata dai libri.

Le osservazioni di Planck, però, ci dicono che non è possibile che questa storia sia corretta. Le curve inflazionarie semplici generano punti caldi e freddi con una deviazione dall'invarianza di scala maggiore di quella osservata e onde gravitazionali tanto intense da essere rilevate. Se continuiamo a sostenere che l'inflazione si sia verificata, i risultati di Planck impongono che l'inflatone abbia «sciato» giù per una curva di densità di energia più complessa, fatta come la seconda montagna, quella con un elevato rischio di valanghe e una cresta piatta che finisce con un ripido dirupo che scende a valle. Anziché una forma semplice, che sale gradualmente, una curva dell'energia di questo tipo salirebbe bruscamente a partire dal minimo (formando il dirupo) per poi appiattirsi improvvisamente (formando la cresta) a un valore della densità di energia un milione di milioni di volte minore della densità di Planck disponibile immediatamente dopo il big bang. In questo caso la densità di energia inflazionaria comprenderebbe una frazione infinitesimale della densità totale di energia dopo il big bang, di gran lunga troppo piccola per far dilatare subito l'universo.

Dato che l'universo non si sta gonfiando, il campo dell'inflatone è libero di cominciare con qualsiasi valore iniziale e variare a velocità smodata, come lo sciatore che si lancia dall'elicottero. L'inflazione, però, può partire solo se l'inflatone in

un certo momento raggiunge un valore corrispondente a un punto lungo la cresta e se varia molto lentamente. Come per lo sciatore che si lancia dall'alto, è rischiosissimo cercare di atterrare sulla cresta alla velocità giusta per poter sciare tranquillamente da lì in poi, allo stesso modo è quasi impossibile per l'inflatone ridurre la propria velocità esattamente nella giusta misura e fino al valore corretto per avviare l'inflazione.

A peggiorare ulteriormente le cose, dato che l'universo non si espande in questo periodo dopo il big bang in cui la velocità dell'inflatone rallenta, qualsiasi deformazione o disomogeneità iniziale nella distribuzione dell'energia nell'universo aumente-

rebbe; una volta cresciute, impedirebbero all'inflazione di partire indipendentemente dall'evoluzione dell'inflatone, come una valanga blocca lo sciatore durante una discesa tranquilla per quanto fosse stata perfetta la traiettoria dall'elicottero alla cresta.

In altre parole, accettando il verdetto dell'oracolo e sostenendo che l'inflazione si sia verificata, i dati di Planck ci costringerebbero alla bizzarra conclusione che l'inflazione parti con una curva di densità di energia «a cresta», nonostante tutti i problemi che ciò comporta. Oppure forse, a questo punto, metteremmo in dubbio la credibilità dell'oracolo.

Il «multipasticcio»

Ovviamente non c'è nessun oracolo. Non siamo tenuti ad accettare l'ipotesi secondo cui si sia verificata un'inflazione, soprattutto perché non ci offre una spiegazione semplice delle caratteristiche dell'universo che osserviamo. I cosmologi dovrebbero valutare questa teoria adottando l'abituale procedura scientifica in cui si stima la probabilità che si sia verificata l'inflazione, posto ciò che osserviamo dell'universo. Da questo punto di vista, è sicuramente una brutta notizia che i dati attuali escludano i modelli inflazionari più semplici a favore di quelli più complicati. Ma a dirla tutta le ultime osservazioni non sono il primo problema con cui si confronta la teoria dell'inflazione; questi risultati hanno solo acuito e complicato problemi noti.

Per esempio, riflettiamo sulla ragionevolezza del fatto che l'universo avesse le condizioni iniziali necessarie per una qualsiasi energia inflazionaria. Affinché parta l'inflazione devono essere soddisfatti due criteri improbabili. Primo, poco dopo il big bang ci deve essere una regione di spazio in cui le fluttuazioni quantistiche dello spazio-tempo si sono placate e lo spazio è ben descritto dalle classiche equazioni einsteiniane della relatività generale; secondo, questa regione di spazio deve essere sufficientemente piatta e avere una distribuzione di energia abbastanza omogenea da permettere all'energia inflazionaria di dominare su tutte le altre forme di energia. Varie stime teoriche della probabilità di trovare una zona con queste caratteristiche subito dopo il big bang fanno ritenere che sia più difficile rispetto a trovare una montagna innevata, dotata di ski-lift e di piste ben mantenute, nel mezzo di un deserto.

Cosa ancora più importante, se fosse facile trovare una regione di spazio che emerge dal big bang piatta e omogenea a sufficienza per avviare l'inflazione, allora quest'ultima non sarebbe stata necessaria. Ricordiamo che i motivi per introdurla erano proprio spiegare come l'universo visibile sia giunto ad avere queste proprietà; se queste stesse proprietà sono necessarie perché l'inflazione parta, con l'unica differenza che serve una regione di spazio più piccola, non abbiamo fatto un grande progresso.

Questi problemi però sono solo l'inizio. Non solo l'inflazione richiede condizioni iniziali difficili da ottenere, ma è anche impossibile fermarla una volta che parte. Questo intoppo si deve alle fluttuazioni quantistiche dello spazio-tempo, per cui l'intensità dell'inflatone varia da zona a zona, in modo che in alcuni punti dello spazio l'inflazione finisce prima che in altri. Tendiamo a ritenere minuscole le fluttuazioni quantistiche, ma già nel 1983 alcuni fisici teorici, tra i quali Steinhardt, si resero conto che grandi balzi

quantistici dell'inflatone, per quanto rari, potrebbero cambiare la storia inflazionaria. Un salto significativo può aumentare l'intensità dell'inflatone fino a valori molto più alti della media, facendo sì che l'inflazione duri molto più a lungo. Sebbene i grandi salti siano rari, le regioni in cui si verificano si espandono enormemente rispetto a quelle in cui non si verificano, e rapidamente dominano lo spazio. Nel giro di pochi istanti un'area in cui si è conclusa l'inflazione viene circondata e quasi fatta sparire dalle regioni che ancora si espandono, e il processo si ripete. Nella maggior parte delle regioni gonfiate l'intensità dell'inflatone varia in un modo che fa sì che la densità di energia decresca e l'inflazione abbia termine, ma rari e ampi salti quantistici farebbero proseguire l'inflazione in alcuni punti e creerebbero ulteriori volumi in espansione. E il processo continua, *ad infinitum*.

Così l'inflazione prosegue in eterno, generando un numero infinito di zone in cui si è conclusa, ognuna delle quali crea un universo a sé stante. Solo nelle zone in cui l'inflazione si è arrestata la velocità di espansione dello spazio è sufficientemente lenta da permettere la formazione di galassie, stelle, pianeti e della vita. La conseguenza preoccupante è che le proprietà cosmologiche di ogni zona differiscono a causa dell'intrinseco effetto aleatorio delle fluttuazioni quantistiche. In generale la maggior parte degli universi non verrà fuori piatto o privo di distorsioni; la distribuzione di materia non sarà quasi omogenea; e quella dei punti caldi e freddi della CMB non sarà quasi invariante per scala.

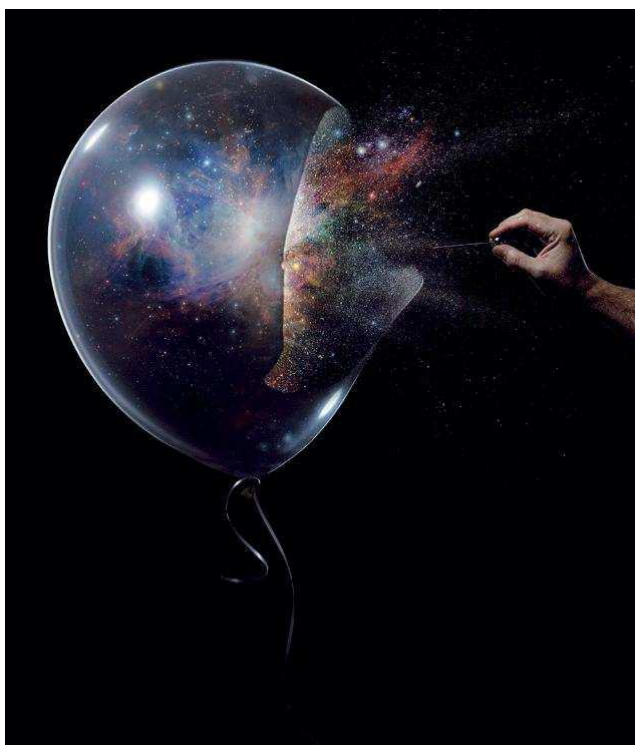
Queste zone comprendono un numero infinito di diversi esiti possibili, e nessun tipo, compresi quelli simili all'universo visibile, è più probabile di un altro. Il risultato è quello che i cosmologi chiamano multiverso. Dato che ogni zona può avere qualsiasi proprietà fisicamente pensabile, il multiverso non spiega perché il nostro universo ha le condizioni specialissime che osserviamo: sono caratteristiche puramente accidentali della nostra specifica regione.

E forse addirittura questa immagine è ancora troppo rosea. Alcuni scienziati contestano che qualche regione dello spazio possa diventare come il nostro universo osservabile.

L'inflazione eterna potrebbe invece portare a un mondo puramente quantistico di fluttuazioni indeterminate e casuali ovunque, anche dove si è conclusa l'inflazione. Vorremmo proporre «multipasticcio» come nome più adatto per descrivere l'esito insolito dell'inflazione eterna sia che risulti composto da una moltitudine infinita di zone con proprietà distribuite casualmente sia che formi un caos quantistico. Dal nostro punto di vista, non fa differenza quale descrizione sia corretta; in entrambi i casi il multipasticcio non prevede le proprietà del nostro universo osservabile come esito probabile. Una buona teoria scientifica dovrebbe spiegare perché avviene quello che osserviamo, e non qualcos'altro, e il multipasticcio fallisce in questo test fondamentale.

Cambio di paradigma

Dati tutti questi problemi, dobbiamo considerare seriamente la prospettiva che non si sia verificata l'inflazione. Se guardiamo le cose un po' più da lontano, possiamo dire che ci sono due possibilità logiche. O l'universo ha avuto un inizio, che chiamiamo comunemente «big bang», oppure non c'è mai stato un inizio, e quella che definiamo una «grande esplosione» fu in realtà un «grande



rimbalzo», una transizione da una precedente fase cosmologica all'attuale fase di espansione. Sebbene la maggior parte dei cosmologi propenda per l'esplosione, non c'è attualmente alcuna prova che ci dice se l'evento di 13,7 miliardi di anni fa fu un'esplosione o un rimbalzo. Ma quest'ultimo, a differenza del «bang», non richiede un successivo periodo di inflazione per generare un universo come il nostro, e quindi le teorie basate su un rimbalzo rappresentano un serio cambio di paradigma rispetto a quelle dell'inflazione.

Un rimbalzo può avere lo stesso risultato di un'esplosione seguita da un'inflazione, perché prima del rimbalzo un periodo di lenta contrazione della durata di miliardi di anni può rendere l'universo omogeneo e piatto. Forse sembra controintuitivo che una lenta contrazione abbia lo stesso effetto di una rapida espansione, ma c'è un ragionamento semplice che mostra che le cose stanno così. Ricordiamo che, senza inflazione, con il passare del tempo un universo in lenta espansione diventerebbe sempre più curvo, deforme e disomogeneo per via degli effetti della gravità sullo spazio e sulla materia. Immaginiamo un filmato di questo processo proiettato al contrario: un enorme universo ricurvo, deformato e non uniforme gradualmente si contrae e diventa piatto e uniforme. La gravità agisce cioè all'inverso come agente omogeneizzante in un universo in lenta contrazione.

Come nell'inflazione, la meccanica quantistica modifica questa semplice storia di omogeneizzazione anche nelle teorie del rimbalzo. Le fluttuazioni quantistiche fanno variare la velocità di contrazione da un punto all'altro, così alcune regioni rimbalzano e cominciano a espandersi e a raffreddarsi prima di altre. È possibile costruire modelli in cui la velocità di contrazione porti a variazioni di temperatura dopo il rimbalzo che sono coerenti con la distribuzione di punti caldi e freddi osservata dal satellite Planck. In altre parole, la contrazione prima di un rimbalzo può fare quello che si riteneva dovesse fare l'inflazione, quando fu inventata.

Allo stesso tempo, le teorie del rimbalzo hanno un grande pregio rispetto all'inflazione: non producono un multipastic-

cio. Quando inizia la fase di contrazione l'universo è già grande e classico (cioè descritto dalla relatività generale) e rimbalza prima di contrarsi fino alle dimensioni in cui prevalgono gli effetti quantistici. Di conseguenza non c'è mai una fase, come il big bang, in cui l'intero universo è dominato dalla meccanica quantistica, e non c'è bisogno di inventare una transizione da quantistico a classico. E dato che non c'è un'inflazione durante l'omogeneizzazione, che faccia sì che le regioni che subiscono rare fluttuazioni di maggior ampiezza aumentino a dismisura di volume, l'omogeneizzazione data dalla contrazione non produce universi multipli. Studi recenti hanno prodotto le prime ipotesi dettagliate per descrivere come l'universo possa essere passato dalla contrazione all'espansione, permettendo così la costruzione di cosmologie complete che contemplano il rimbalzo.

Scienza non empirica?

Dati i problemi dell'inflazione e le possibilità offerte dalle cosmologie del rimbalzo, ci si aspetterebbe fra i ricercatori un vivace dibattito su come distinguere fra queste teorie attraverso le osservazioni. C'è però un intoppo: la cosmologia inflazionaria, per come è formulata attualmente, non si può valutare usando il metodo scientifico. Come abbiamo visto, l'esito finale che prevediamo grazie all'inflazione può cambiare facilmente se variamo le condizioni iniziali, modifichiamo la forma della curva di densità dell'energia inflazionaria o semplicemente ammettiamo che porti a un'inflazione eterna e a un multipasticcio. Ognuna per conto suo e tutte insieme, queste caratteristiche rendono l'inflazione così flessibile che nessun esperimento la può confutare.

Alcuni ricercatori accettano che l'inflazione non si possa mettere alla prova, ma si rifiutano di abbandonarla. Suggestiscono invece di cambiare la scienza, scartando una delle proprietà che la definiscono: la verifica empirica. Questa idea ha scatenato un otto volante di discussioni sulla natura della scienza e sulla sua possibile ridefinizione, sostenendo l'idea di qualche tipo di scienza non empirica.

Un comune fraintendimento è che con gli esperimenti sia possibile falsificare una teoria. Nella pratica, una teoria difettosa viene via via vaccinata contro gli esperimenti mettendole delle toppe. La teoria è resa sempre più personalizzata e misteriosa, in modo da conformarsi alle nuove osservazioni, fino a raggiungere uno stato in cui il suo potere di dare spiegazioni diminuisce a tal punto che viene abbandonata. Il potere esplicativo di una teoria è misurato dall'insieme di possibilità che esclude. Più è vaccinata e meno esclude, e quindi meno è potente. Una teoria come il multipasticcio non esclude niente, e quindi ha potenza nulla. Adottare una teoria vuota come standard indiscusso richiede qualche garanzia esterna alla scienza: in mancanza di un oracolo riconosciuto, l'unica alternativa consiste nell'invocare un'autorità. Ma la storia ci insegna che è la strada sbagliata da percorrere.

Oggi siamo fortunati ad avere quesiti precisi e fondamentali che ci vengono imposti dalle osservazioni. Il fatto che le nostre idee prevalenti non abbiano funzionato è un'occasione storica per una rivoluzione teorica. Invece di mettere un punto fermo all'universo delle origini, dovremmo riconoscere che la cosmologia è ancora completamente aperta. ■

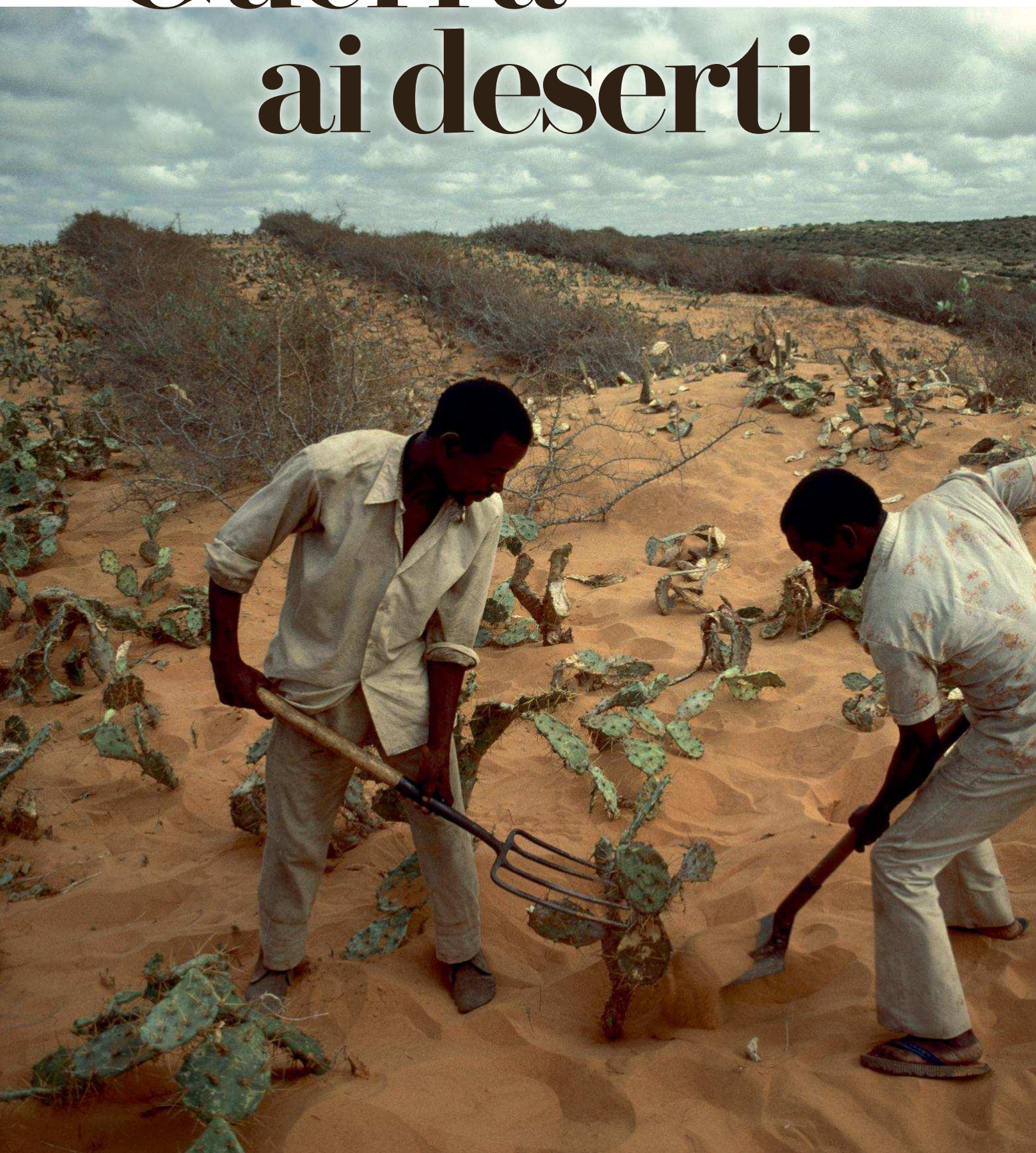
PER APPROFONDIRE

Inflationary Paradigm in Trouble after Planck 2013. Ijjas A. e altri, in «Physics Letters B», Vol. 723, n. 4-5, pp. 261-266, 25 giugno 2013.

Il dibattito sull'inflazione. Steinhardt P.J., in «Le Scienze» n. 514, giugno 2011.

AMBIENTE

Guerra ai deserti



La lotta alla desertificazione, una minaccia per oltre un miliardo di persone, può contare su tecniche agricole e piante adatte ad ambienti aridi che possono anche sostenere le economie locali



di Alfonso Lucifredi

Dodici milioni di ettari di terra arabile persi ogni anno, più di 100 nazioni coinvolte, oltre un miliardo di persone a rischio di povertà e fame. I numeri forniti dalla United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD) non lasciano dubbi: la lotta alla desertificazione sarà una delle

battaglie più importanti del XXI secolo. Il costo dei danni causati dalla perdita di terreni fertili è stimabile in 490 miliardi di dollari ogni anno. Le implicazioni del problema non sono solo economiche, ma anche sociali: si ritiene che la sola scarsità di acqua potrebbe costringere circa 700 milioni di persone a emigrare dalle terre d'origine entro il 2030. E già oggi carestie, guerre e migrazioni di massa sono causate dall'impoverimento dei suoli, un fenomeno che interessa in gran parte i paesi in via di sviluppo.

Gli esempi si sprecano: dalla fascia subsahariana del Sahel, palcoscenico tra gli anni settanta e ottanta di una delle più gravi carestie della storia dell'umanità, passando per ampie aree di Cina occidentale e India nord-occidentale, arrivando alla progressiva scomparsa dei laghi Ciad, in Africa centro-settentrionale, e Aral, in Asia centrale. Ed è proprio la spettrale flotta di vecchi pescherecci, ormai arenati a decine di chilometri dalle nuove coste del lago asiatico, a rappresentare una delle immagini iconiche di questo dramma planetario.

L'impatto dei cambiamenti climatici aggrava il processo, rendendo estremi fenomeni già naturalmente presenti, come ondate di caldo e siccità. L'essere umano ne è responsabile indirettamente, tramite il riscaldamento globale antropogenico, ma anche direttamente: lo sfruttamento incontrollato delle acque dolci per l'irrigazione e l'uso scorretto di terreni vulnerabili è all'origine dei processi di desertificazione in molte aree del mondo.

Nell'ottobre 2015 i paesi aderenti all'UNCCD hanno firmato un accordo che pone come obiettivo principale il raggiungimento della Land Degradation Neutrality (LDN). Il fine ultimo è bloccare e invertire i processi di degrado del suolo, recuperando terreni aridi per destinarli a coltivazioni sostenibili o al pascolo. Nell'ottica dei cambiamenti climatici, il processo può anche fornire un aiuto prezioso per rimuovere gas serra dall'atmosfera. Ritornando a essere produttivi, i suoli funzionano nel contempo da *carbon sink*, serbatoi di carbonio sottratto all'atmosfera.

Per fronteggiare il problema si stanno mettendo in atto strategie di vario genere. Da un lato, nuove tecniche agricole, più sostenibili e moderne, cercano di mantenere la fertilità dei suoli prevenendo perdita di nutrienti ed erosione. Dall'altro, l'uso di specie vegetali particolarmente adatte a sopportare siccità e aridità può

Economia dei fichi. Per rallentare la desertificazione, in Somalia si piantano fichi d'India, che poi possono essere usati come foraggio per il bestiame e i cui frutti possono essere venduti nei mercati.

fornire una spinta in più verso la salvaguardia di territori ancora fertili. Tra queste, *Haloxylon ammodendron* in Cina e Uzbekistan, *Faidherbia albida* in Africa, in particolare sulle sponde del lago Ciad, e *Rheum palaestinum*, originaria di Israele e Giordania, sembrano alcune tra le specie vegetali più promettenti in questo campo di studi. La riforestazione, inoltre, può avere un ruolo chiave nel recuperare suoli improduttivi.

Ma spesso il problema non è trovare tecnologie o specie vegetali adatte ad arginare il fenomeno, quanto ottenere consenso, comprensione e collaborazione delle popolazioni locali. In questi contesti, non sono tanto le tematiche ambientali a motivare le scelte, quanto le necessità quotidiane. Per questo motivo i progetti di cooperazione ricoprono un ruolo fondamentale.

Seguendo questa filosofia, il Nucleo ricerca desertificazione dell'Università di Sassari (NRD-UNISS) porta avanti ormai da vent'anni molti progetti volti a fronteggiare il problema, dando sempre ampio spazio alla voce delle popolazioni rurali. Con il centro hanno collaborato molti agronomi, ma anche economisti, biologi, naturalisti, geologi, medici, ingegneri, forestali, giuristi, sociologi. È l'unico centro italiano che ha scelto queste tematiche come sua missione, ed è coinvolto, sia come capofila sia come partner, in tanti progetti di ricerca e di cooperazione in tutto il mondo.

Le tante speranze riposte su *Jatropha curcas*

Marcello Lubino è un agronomo, si è specializzato in sviluppo rurale in Irlanda per fare poi il dottorato di ricerca a Sassari. Presso il centro NRD-UNISS, per cui lavora dal 2004, ha iniziato a occuparsi di progettazione europea. Ha fatto anche ricerca, ma sempre legata alla cooperazione. Tra i tanti progetti a cui ha partecipato, il Ghaja Project ha approfondito la conoscenza globale di *Jatropha curcas*, una pianta su cui sono state riposte altissime aspettative negli anni passati, in particolare nel campo della lotta alla desertificazione.

Jatropha curcas è un arbusto appartenente alla famiglia delle Euforbiacee. Originario dell'America centrale, sopravvive anche in ambienti estremamente aridi e, trattandosi di pianta tossica, viene frequentemente usato come recinzione viva, per proteggere dagli animali selvatici orti e campi coltivati. Come mai, trattandosi di una coltura non alimentare, ha avuto un successo così clamoroso?

«Le aspettative su *J. curcas* – racconta Lubino – erano sì legate alla sua capacità di sopravvivere in ambienti aridi, ma soprattutto ai suoi semi oleosi, da cui si può ricavare un *biofuel*, un olio combustibile biologico. Si è cominciato a coltivare questa pianta un po' ovunque nel mondo, con la speranza di ottenere biodiesel a costi molto bassi. Spesso però si è piantato senza tener conto delle popolazioni locali. In questo senso Ghaja è stato di grande aiuto per conoscere meglio i reali vantaggi provenienti dall'impiego di questa specie».

Non tutto, però, è andato per il meglio, dato che *J. curcas* non è la pianta dei miracoli. «Nelle vicinanze della nostra piantagione in Ghana abbiamo visto una società europea che aveva affittato,

Alfonso Lucifredi è un naturalista e giornalista scientifico. Il suo ultimo libro è *Alla scoperta della vita. Le grandi rivoluzioni delle scienze naturali* (Hoepli, 2017).



contrattando con i capi villaggio, i terreni più fertili e non quelli marginali. Lo scopo era coltivarli con questa pianta, con l'interesse di produrre biocarburante».

J. curcas non è commestibile: si tratta di *land grabbing*, sottrazione di terra alle colture alimentari, che è un problema da non sottovalutare in zone povere. E il biocarburante non era neanche destinato alle popolazioni ghanesi, ma al mercato europeo. Il mercato africano è molto più facile da sfruttare: i terreni e la forza lavoro hanno un costo basso, inoltre si possono ottenere produzioni intensive con pesticidi in grande quantità, dato che si tratta di piantagioni non alimentari. «E se stai inquinando – continua Lubino – poco importa: non si tratta di suolo europeo. Tutto questo a discapito delle popolazioni locali. La stessa cosa avviene in Cina, in India. Gli indiani in particolare stanno conducendo ricerche intensive su questa pianta. Ma oggi le sue potenzialità sono state assai ridimensionate».

Anche se resiste all'aridità, *J. curcas* è una pianta tropicale. È originaria del Messico, e nel suo habitat d'origine riceve buone quantità di acqua. Si adatta bene ad ambienti aridi e semiaridi, ma diventa meno produttiva. Dove non piove con frequenza deve essere irrigata per produrre grandi quantità di olio.

Rispetto alle aziende che hanno investito alla cieca o quasi, l'NRD-UNISS ha creato piantagioni piccole ed estensive, sfruttando suoli marginali e associandole a colture alimentari, secondo la pratica dell'*intercropping*. La risposta è stata positiva in termini di resistenza alla siccità, anche se nel nord del Ghana, nelle aree interessate dal progetto Ghaja, la pluviometria non è desertica; si parla di 600-900 millimetri all'anno. In Burkina Faso (progetto JEF), con una piovosità decisamente più bassa (mediamente 450 millimetri all'anno), la pianta, pur non morendo, ha perso tantissima produttività.

Un fallimento, quindi? «Tutt'altro – osserva Lubino – sono stati aggiunti tasselli fondamentali nel *mare magnum* di incertezza che c'è ancora intorno a questa specie. Sapere se è meglio fare prima la semina o il trapianto, sperimentare varie metodologie di semina. Creare però piantagioni estensive di *Jatropha* per produrre energia pulita non è possibile, economicamente parlando,

IN BREVE

Tra consumo del suolo, eccessivo sfruttamento delle sue risorse, siccità e temperature sempre più alte a causa dei cambiamenti climatici, aree sempre più vaste

del pianeta rischiano di trasformarsi in deserto.

Questo processo mette in pericolo la sopravvivenza di oltre un miliardo di persone. Lo sviluppo di nuove

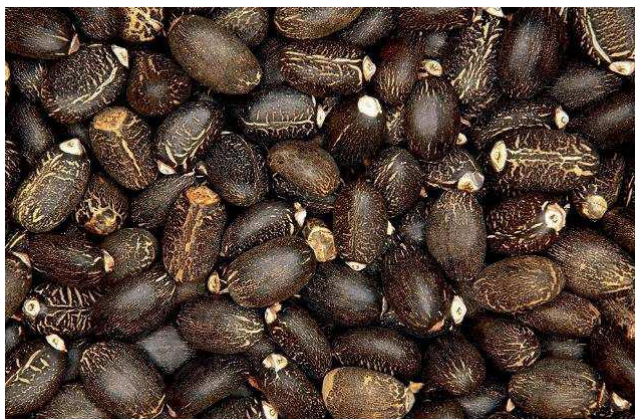
tecniche agricole e l'uso di piante particolarmente adatte potrebbero fermare o almeno rallentare questo fenomeno.

Tra i principali centri impegnati in

questo campo di studi c'è una realtà tutta italiana, che ha progetti in corso un po' ovunque nel mondo: dalla Tanzania alla Mauritania, dall'Egitto al Perù.



Energie locali. Alcuni membri del Ghaja Project, sviluppato nel nord del Ghana e basato sull'impiego della pianta *Jatropha curcas*, dai cui semi (sotto) si produce un olio combustibile.



senza chiudere in deficit. Ma le implicazioni sociali del progetto sono state importanti. Con l'olio si può produrre un sapone di qualità accettabile. Si possono generare redditi alternativi alle colture alimentari».

Le donne africane sono state coinvolte sia nella produzione del sapone sia nella coltivazione di *J. curcas*. In queste comunità rurali i terreni marginali sono affidati alle donne, quando vengono spartiti all'interno della famiglia dal patriarca. E si tratta di terreni adatti per queste produzioni.

«Con il 2016 – osserva Giuseppe Enne, fondatore di NRD-UNISS e attuale presidente del comitato scientifico del centro – si è concluso il progetto Energy Facility, JEF, che ha aiutato ad affrancare la donna da attività massacranti». A Tamale, nel West Mamprusi District, in Ghana, e a Dori, nella Seno Province, in Burkina Faso, sono state create piattaforme multifunzionali in grado di realizzare trebbiatura e successiva molitura di miglio, mais e sorgo. I motori del sistema sono alimentati con olio di *J. curcas*. Sono state inoltre realizzate pompe solari che hanno affrancato la donna dal prelievo manuale dell'acqua.

Un'altra connessione con la desertificazione è che produrre energia, o disporne in maniera autoctona, permette di ridurre il prelievo dell'unica altra forma disponibile di energia: il taglio della legna. Questa attività, in territori come il Sahel, dove la copertura vegetale è ridottissima, porta un degrado per cui le persone devono poi migrare. Il fuoco, necessario per le cotture, va recuperato in qualche modo, e il taglio di alberi e arbusti si rivela indispensabile per la sopravvivenza. Attraverso la fornitura di una fonte di energia autoctona si contiene questo fenomeno e si determina anche una rigenerazione spontanea della copertura arbustiva che era stata prelevata.

Atriplex nummularia e i rischi del sovrapascolamento

Il primo grande progetto di cooperazione di NRD-UNISS ha affrontato il problema della desertificazione in Nord Africa, coinvolgendo comunità agropastorali locali in Marocco e Tunisia. Anche in questo caso, all'origine della perdita di terreno fertile c'erano i cambiamenti climatici e pratiche agricole poco sostenibili, ma a svolgere un ruolo fondamentale si era aggiunto un fattore spesso ignorato: l'eccessivo carico di bestiame. Il cosiddetto sovrapascolamento, od *overgrazing*, è alla base di molti processi di degrado dei terreni.

In un'area a nord di Marrakech, nel Marocco centro-meridionale, i ricercatori dell'NRD-UNISS hanno incontrato un forte degrado: i pastori non riuscivano più a sostenere le proprie greggi usando le piante spontanee dei pascoli. Il terreno era sottoposto a erosione eolica e le piogge erano limitate (meno di 300 millimetri all'anno). Sempre più di frequente, i pastori erano costretti a comprare il foraggio per le greggi e non ammettevano l'esistenza dell'*overgrazing*.

Dalla testimonianza degli allevatori emerge la memoria storica di un cambiamento climatico. Lubino racconta: «Ovviamente c'è il ricordo di estati più fresche, siccità più brevi, maggior pioggia. Non l'associano però al cambiamento climatico: si tratta di un mondo rurale composto spesso da persone analfabete. Agli agricoltori che vivono a 70 chilometri da Marrakech, dei problemi legati alla salvaguardia dell'ambiente o del riscaldamento globale poco importa. Indubbiamente però concordano tutti nell'affermare che negli ultimi decenni ci sia stato un cambio del clima».

Ci vogliono soluzioni concrete affinché siano accettate dagli agricoltori e dalle comunità. In questo caso il progetto si è rivelato un successo proprio per questo motivo: la soluzione è stata valutata e accettata dai partner locali. Hanno capito il valore del progetto e la sua efficacia, e così, quando il progetto è finito, nel 2009, si era avviato un sistema che poteva mantenersi autonomamente. Spesso succede che, finito il progetto e finiti i finanziamenti, le attività si fermano e si ritorni alla condizione originaria: non è stato questo il caso.

La soluzione è stata l'uso dell'arbusto *Atriplex nummularia*, specie aridoresistente e sempreverde dotata di un apparato radicale molto esteso che la ancora bene al terreno e porta in superficie i nutrienti dal sottosuolo. Richiede poca acqua ed è un frangivento, perciò contribuisce a ridurre l'erosione eolica. La specie è stata piantata in filari, su 2000 ettari di pascoli degradati. Gli agricoltori hanno accettato che venisse coltivata perché si tratta di una specie foraggera, con discreto contenuto di proteine, che può essere utilizzata nella dieta degli animali.

La pianta ha arricchito il suolo di sostanza organica, ha combattuto l'erosione, ha aumentato la fertilità del terreno. Trattandosi di una specie sempreverde, ha fornito un foraggio per gli animali in quei periodi in cui non si riusciva a ottenerne dal territorio. Il segreto del progetto è stato offrire una soluzione condivisa e accettata da pastori e agricoltori. La coltivazione di una specie non pascolabile, con l'unico scopo di ripristinare i suoli, non sarebbe stata accettata.

A. nummularia è stata piantata dopo essere stata allevata in vivaio, dove la sua produzione è stata alternata a quella di piante da frutto. Le popolazioni sono state formate, dando lavoro ai giovani all'interno del vivaio. In Africa si sta vivendo un vero e proprio esodo dalle campagne verso la città: secondo le stime delle Nazioni Unite, l'1-2 per cento delle popolazioni rurali subsaharia-

ne migra ogni anno verso i centri urbani, al punto che nei prossimi vent'anni alcune città, anche a causa dell'alto tasso di natalità, potrebbero vedere raddoppiata la propria popolazione. In questo caso invece il fenomeno è stato tamponato. Bloccando il vento, fermando l'erosione e restituendo fertilità ai terreni si è creato un microclima dove sono riapparse le specie locali; ciò grazie anche all'azione di ombreggiamento delle fronde, alla conseguente minore evaporazione dell'acqua dal suolo e alla maggiore ritenzione idrica. Il terreno è come rinato.

Oggi la gestione del vivaio è mandata avanti dalle popolazioni locali, che sanno come coltivare, trapiantare, potare e gestire le piantagioni. La specie è stata piantata in terreni comuni, dove solitamente nessuno vuole investire. Sono nate cooperative che si occupano della gestione dei pascoli e in cui viene fatta formazione su come deve essere gestita e protetta tutta la piantagione, che deve essere messa a disposizione degli animali solo quando è in grado di sopportare il carico di bestiame.

Il progetto non è stato sviluppato solo in Marocco, ma anche in Tunisia: qui però si è lavorato con il fico d'India (*Opuntia ficus-indica*). Anche in questo caso la pianta è stata introdotta in pascoli degradati per usarla come foraggio per il bestiame. Non è proteica come *A. nummularia*, e quindi gli animali necessitano di un'integrazione nell'alimentazione, ma in compenso è molto ricca d'acqua. Inoltre il fico d'India può fornire un reddito extra agli allevatori, che possono vendere i suoi frutti nei *suq*. L'Unione Europea ha celebrato questo progetto come esempio di successo e modello per il futuro.

Perù, Mediterraneo e il futuro degli studi sulla desertificazione

Oggi il centro NRD-UNISS ha progetti in corso un po' ovunque nel mondo: dalla Tanzania alla Mauritania, dall'Egitto al Perù.

Proprio il paese andino è protagonista di un progetto del centro che dimostra come il problema del degrado dei suoli non riguarda solo i deserti. La selva alta lungo il bacino dell'Ucubamba, nella regione amazzonica del Perù, nel nord del paese, è interessata da gravi fenomeni di degrado ed erosione del suolo a causa di deforestazione, di un'espansione non pianificata dell'agricoltura e degli effetti del cambiamento climatico. Quest'area risulta così particolarmente esposta a eventi estremi come alluvioni, frane, smottamenti e inondazioni, che mettono a rischio il sistema socio-economico delle popolazioni locali. Il progetto, condotto dall'economista ed ex direttore del centro NRD-UNISS Luciano Gutierrez e dalla sociologa Laura Altea e finanziato dal Fondo Italo Peruviano, promuove la riforestazione e il recupero dei suoli usando il bambù (*Guadua angustifolia*). Grazie al suo fitto sistema radicale, questa pianta stabilizza i terreni e protegge dall'erosione le sponde dei fiumi. Inoltre ha ottime capacità di sequestrare il carbonio dall'atmosfera, cresce rapidamente e ha tanti impieghi che possono fornire un reddito extra alle popolazioni locali.

Attenzione, infine, a non sottovalutare il problema della desertificazione nel Mediterraneo. «Nei primissimi anni novanta – racconta Enne – abbiamo fondato il centro per studiare il degrado dei suoli generato dall'allevamento in Sardegna. Il sovrappascolamento in aree come la Nurra, nel nord-ovest della regione, era drammatico. Tra l'altro nell'Ottocento si erano abbattute le foreste per fare traversine delle ferrovie, carbone e altro. La vegetazione non si è più ripresa fino a pochi decenni fa, quando è diminuita la pressione di pascolo ed è iniziato l'abbandono delle zone interne».

Nel Mediterraneo la desertificazione è dovuta a diversi fattori,

Il progetto WADIS-MAR

I wadi, effimeri e tumultuosi fiumi tipici delle zone aride che per poche settimane all'anno trasportano milioni di metri cubi d'acqua, sono una risorsa preziosa e sottovalutata. Il progetto WADIS-MAR (Water harvesting and Agricultural techniques in Dry lands: an Integrated and Sustainable model in Maghreb Regions, www.wadismar.eu), nato dalla collaborazione tra il Nucleo di ricerca sulla desertificazione dell'Università di Sassari e vari enti internazionali, ha sviluppato questa idea. Sottraendo al deserto e all'evaporazione parte di quell'acqua, è possibile fronteggiare la desertificazione e aiutare le coltivazioni in aree particolarmente aride.

Così nelle regioni magrebine di Oued Biskra, in Algeria, e di Oum Zessar, in Tunisia, questo progetto ha preso vita. Usando i wadi si sono ricaricati acquiferi sotterranei in modo da aumentare la disponibilità di risorse idriche e ridurre l'evaporazione. Ma non solo: si è investito nella diffusione di informazioni agrometeorologiche e di bollettini meteo e nella formazione del personale, in modo da fornire le conoscenze necessarie per una gestione sostenibile delle risorse idriche. Il progetto, coordinato per NRD-UNISS da Giorgio Ghiglieri, docente di idrogeologia dell'Università di Cagliari, ha messo in risalto un tassello fondamentale del complicato puzzle della lotta alla desertificazione: non è sufficiente avere a disposizione grandi quantità d'acqua, se non si hanno le conoscenze necessarie per la loro gestione.

come incendi, erosione, salinizzazione per effetto dell'irrigazione, acidificazione dei suoli, bilancio del carbonio negativo, anche per effetto del cambiamento climatico. In Italia i dati sono allarmanti: stando ai numeri forniti dal Consiglio nazionale delle ricerche, circa il 21 per cento del territorio è a rischio desertificazione. Nelle regioni meridionali la percentuale sale addirittura al 41 per cento. Le cause, anche in questo caso, non sono solo climatiche; riguardano anche una cattiva gestione del suolo.

Ci sono due tendenze: da una parte c'è abbandono delle campagne nelle zone meno fertili, dall'altra una forte concentrazione dei distretti produttivi nei terreni più facilmente meccanizzabili. Infatti le foreste sono aumentate in questi ultimi anni perché le zone montane più impervie sono state abbandonate. Ma anche l'abbandono può favorire la desertificazione: le fasi dal pascolo erbaceo alla foresta, ovvero la successione ecologica che avviene naturalmente in ambiente mediterraneo, ha una fase intermedia arbustiva che dura decenni, ed è la più vulnerabile agli incendi.

Un altro evento diffuso è la desertificazione selvaggia: la perdita totale di fertilità del suolo per sempre. Riguarda discariche di miniere, cementificazione, impermeabilizzazione dei suoli con la costruzione di strade e l'urbanizzazione.

La situazione è tutt'altro che semplice, ma il centro è riuscito a realizzare progetti innovativi anche nel Mediterraneo, in territorio sardo. Un esempio significativo ha interessato due aree distinte, due «isole nell'isola», complementari tra loro: da un lato i pascoli arborati e ricchi di biodiversità della Gallura, nel nord della regione, dove si producono sughero, latte di pecora e carne di bovini; dall'altro la zona di Arborea, in provincia di Oristano, dove la coltivazione di foraggi per l'allevamento intensivo di bovini da latte ha aumentato la fertilità dei terreni ma ha anche reso l'area vulnerabile all'inquinamento delle falde.

Da un lato si aveva un sistema in deficit, dall'altro uno in ec-



Palme antispostamento. Barriere fatte di rami di palma tentano di arginare gli spostamenti della sabbia nel deserto del Sahara.

cesso di nutrienti: il centro NRD-UNISS ha facilitato la connessione tra questi due distretti, favorendo lo sviluppo di una filiera corta della carne bovina. Oggi nei centri di ingrasso di Arborea sono allevati ogni anno migliaia di vitelli da ristallo provenienti dai pascoli della Gallura. Il risultato ha favorito entrambi i distretti, aiutando l'economia locale e mitigando il rischio di degrado del suolo.

Anche la *governance* dell'acqua è fondamentale per la gestione dell'aridità dei suoli. L'NRD-UNISS ha portato avanti diversi progetti su questo fronte. L'ultimo è stato una sperimentazione di un metodo di mediazione dei conflitti ambientali ispirato a una tradizione gallurese, la Rasgioni (la ragione), una specie di arbitrato tra parti portato avanti da una persona che in Gallura si chiamava «l'uomo di mezzo», ossia il mediatore. È stata inscenata in modo quasi teatrale: da una parte gli imprenditori che usano l'acqua per l'irrigazione e gli usi agro-industriali e dall'altra le istituzioni, con una giuria internazionale che ha valutato le varie ragioni delle diverse parti. La sperimentazione è già stata replicata con successo dall'Università di Loughborough, nel Regno Unito.

In conclusione, la desertificazione è un problema che si presenta in mille forme diverse e non esiste un sistema semplice per contrastarlo. Non ci sono soluzioni magiche, non esiste la pianta miracolosa che risolve tutto. La lotta ai deserti è un misto di aspetti ecologici, biologici, chimici, ma anche sociali ed economici. Occorre un approccio di tipo interdisciplinare e, soprattutto, si deve affrontare ogni singolo caso tenendo conto sia dell'ambiente sia del contesto culturale in cui si è sviluppato. «Spesso – spiega Pier Paolo Roggero, attuale direttore dell'NRD-UNISS – quando le persone parlano di cambiamento climatico, di desertificazione o di perdita di biodiversità li vedono come concetti astratti e difficili da comprendere, mascherati dalla naturale variabilità del tempo meteorologico. Inoltre, mentre la temperatura la senti, il suolo non lo vedi, non

ne percepisci subito i cambiamenti. Si è avuto un esempio chiaro in Australia, dove sono stati distrutti milioni di ettari di terreno per salinizzazione, a seguito della deforestazione».

La perdita di foreste ha infatti ridotto l'evapotraspirazione, ha alterato il bilancio idrico e ha fatto risalire le falde saline, diffusissime in Australia. È un processo che è durato solo cent'anni, ma se si perde appena lo 0,5 per cento di sostanza organica nel terreno, per recuperarla ci vogliono 200 anni.

La percezione del problema, nelle popolazioni locali, è spesso distorta. In pochi riescono a rendersi conto della sua gravità, e i politici si comportano di conseguenza. La chiave di lettura, per il futuro, sarà quindi la comunicazione con chi deve affrontare la desertificazione sulla propria pelle. Proprio perché è fondamentale sapere che si tratta di una guerra che va combattuta da subito, e non può essere sempre vinta. ■

PER APPROFONDIRE

Effects of Restoration Actions on Soil and Landscape Functions: *Atriplex nummularia* L. plantations in Ouled Dlim (Central Morocco). Zucca C., Pulido-Fernández M., Fava F., Dessena L. e Mulas M., in «Soil and Tillage Research», Vol. 133, pp. 101-110, ottobre 2013.

State-of-the-Art of the *Jatropha curcas* Productive Chain: From Sowing to Biodiesel and By-Products. Contran N., Chessa L., Lubino M., Bellavite D., Roggero P. e Enne G., in «Industrial crops and products», Vol. 42, pp. 202-215, maggio 2015.

Hybrid Knowledge for Understanding Complex Agri-Environmental Issues: Nitrate Pollution in Italy. Nguyen T.P.L., Seddaiu G. e Roggero P.P., in «International Journal of Agricultural Sustainability», Vol. 12, pp 164-182, agosto 2013.

Integrating Local Knowledge with Experimental Research: Case Studies on Managing Cropping Systems in Italy and Australia. Allan C., Nguyen T.P.L., Seddaiu G., Wilson B. e Roggero P.P., in «Italian Journal of Agronomy», Vol. 8, n. 2, pp. 108-116, giugno 2013.

Achieving Land Degradation Neutrality at the Country Level - Building blocks for LDN Target Setting. United Nations Convention to Combat Desertification, 2016.

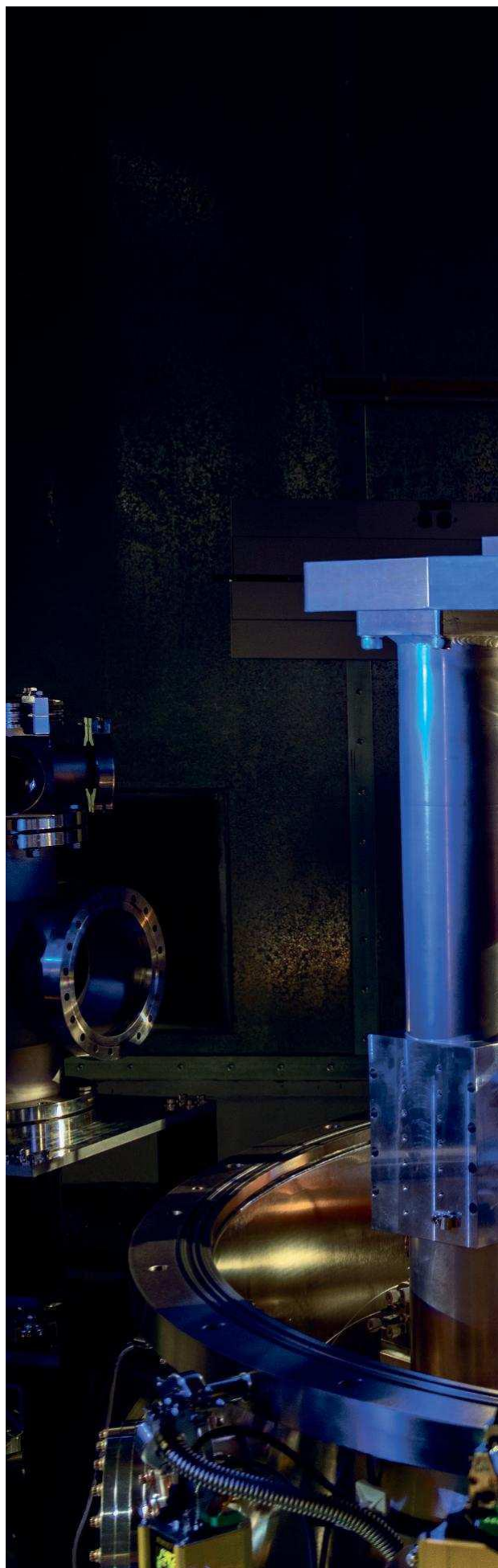
UNPROBLEMA DI MASSA

METROLOGIA

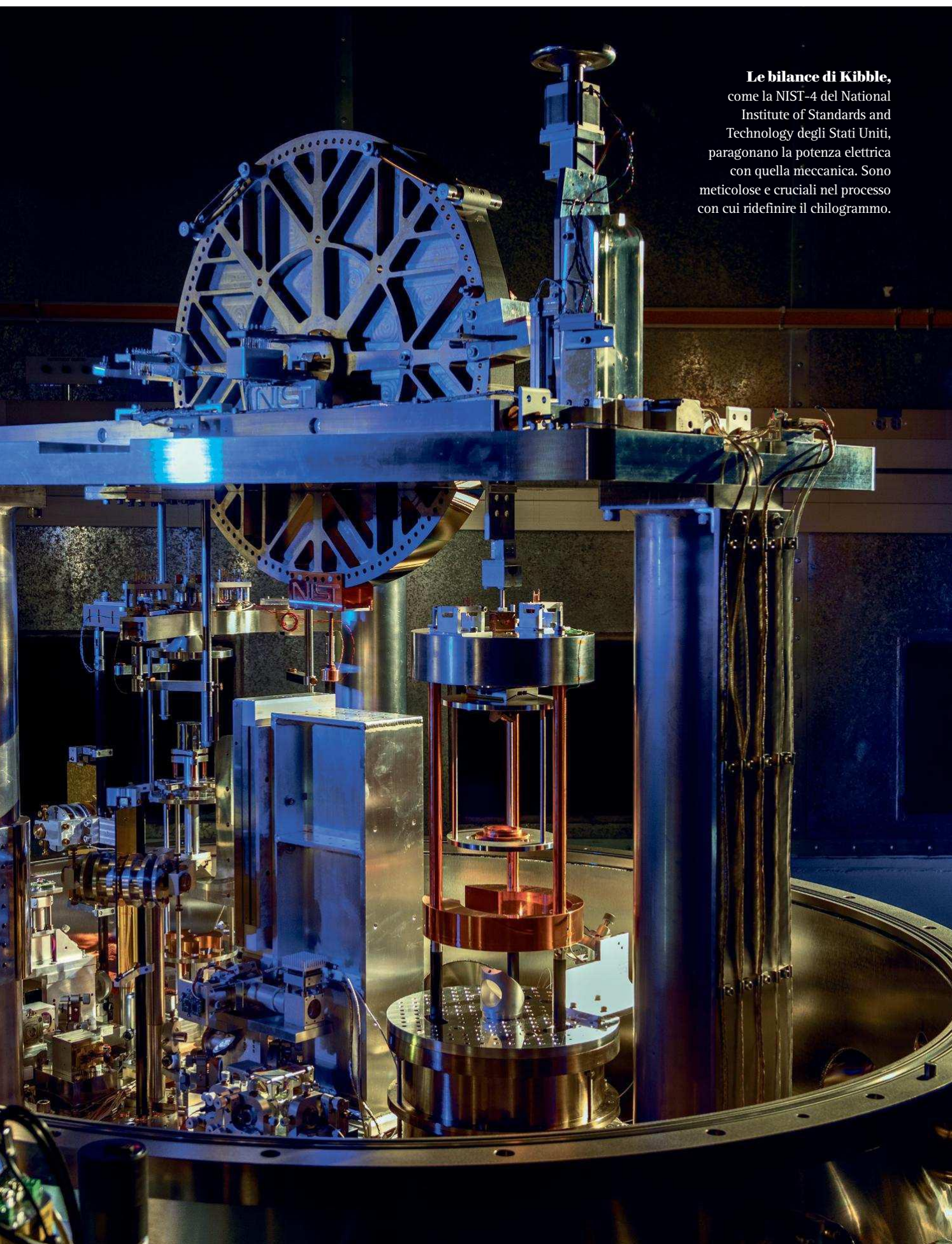
Il lungo sforzo
per liberarsi
del decadente
manufatto
ottocentesco
che definisce
il chilogrammo
è prossimo alla
conclusione

di Tim Folgers

Fotografie di Richard Barnes



Le bilance di Kibble,
come la NIST-4 del National
Institute of Standards and
Technology degli Stati Uniti,
paragonano la potenza elettrica
con quella meccanica. Sono
meticolose e cruciali nel processo
con cui ridefinire il chilogrammo.



Tim Folger scrive per «National Geographic», «Discover» e altre pubblicazioni. È anche tra gli autori della serie *The Best American Science and Nature Writing*, un'antologia annuale pubblicata da Houghton Mifflin Harcourt.



Un pomeriggio dello scorso aprile John Pratt era teso mentre si avvicinava ai controlli di sicurezza dell'aeroporto internazionale Dulles di Washington: stipati nella borsa della macchina fotografica c'erano quattro cilindri metallici, il genere di oggetto perfetto per attrarre l'attenzione dei sospettosi dipendenti della Transportation Security Administration, un'agenzia che fa parte del Department of Homeland Security degli Stati Uniti. Ogni cilindro pesava esattamente un chilogrammo: uno, fatto con una lega di platino-iridio grande circa come la metà di una scatoletta di tonno, valeva almeno 40.000 dollari (al momento la quotazione del platino è di circa 1000 dollari per oncia troy, un'unità di misura standard per i metalli preziosi) e gli altri tre erano di acciaio inossidabile finemente lavorato.

La missione di Pratt era di consegnarli sani e salvi – e inalterati – a un collega in un sobborgo di Parigi.

Aveva con sé i documenti del National Institute of Standards and Technology (NIST) degli Stati Uniti che avrebbero dovuto agevolare il passaggio ai controlli di sicurezza, spiegando che Pratt trasportava quattro copie statunitensi ufficiali del chilogrammo – il riferimento di massa che serve come base ufficiale per tutte le misurazioni di peso nel paese – e specificando che i chilogrammi non dovevano essere toccati o rimossi dai loro contenitori di protezione.

Pratt, uno smilzo ex musicista punk rock, dirige la Quantum Measurement Division del NIST a Gaithersburg, nel Maryland. «Il dipendente della Transportation Security Administration mi stava ponendo molte difficoltà, – racconta – ma dopo aver letto i documenti è diventato molto più affabile». Nel giro di pochi minuti a Pratt è stato permesso di passare oltre e imbarcarsi sul volo che avrebbe raggiunto Parigi dopo sette ore, e che poneva al dirigente un altro dilemma: come gestire il costoso bagaglio a mano se avesse dovuto alzarsi? Avrebbe dovuto portare sempre con sé la borsa, come gli avevano consigliato diversi colleghi? «Ammetto di averla lasciata riposta sotto il sedile davanti al mio quando sono andato al bagno», racconta Pratt. «Dunque per un breve periodo l'ho persa di vista, e qualcuno potrebbe aver strofinato le mani sui chilogrammi».

Una manipolazione del genere avrebbe rovinato molti mesi di accurato lavoro dedicato a misurare i chilogrammi con un margine di errore di poche parti su un miliardo. Pratt portava i cilindri all'Ufficio internazionale dei pesi e delle misure (o BIPM, dal fran-

cese Bureau International des Poids et Mesures) a Sèvres, una cittadina non distante da Parigi, famosa per le sue porcellane. Dopo pochi mesi i metrologi locali li avrebbero confrontati con cilindri metallici identici provenienti da altre tre nazioni, insieme a una sfera di un chilogrammo fatta di silicio con un elevato grado di purezza realizzata dal laboratorio nazionale di metrologia tedesco. Era l'ultimo passo di un cambiamento storico nel modo in cui il mondo misura la massa.

Dal 1889, lo stesso anno in cui fu aperta al pubblico la Torre Eiffel, il chilogrammo è stato definito come la massa di un cilindro di platino-iridio conservato sotto tre campane di vetro concentriche in una camera di sicurezza nel quartier generale del BIPM. Il prototipo internazionale del chilogrammo, anche noto come IPK (dall'inglese International Prototype Kilogram) o *Le Grand K*, è il chilogrammo primigenio ideale da cui derivano tutte le altre unità di misura nazionali per la massa. Il chilogrammo è un'anomalia: è l'ultima unità di misura ancora legata a un oggetto fisico, ma non sarà così ancora per molto. Entro la fine del 2018 *Le Grand K* sarà destituito, e al chilogrammo sarà assegnata una nuova definizione basata sulla costante di Planck, un valore fisso della teoria quantistica legato alla quantità di energia trasportata da un singolo quanto di luce, o fotone.

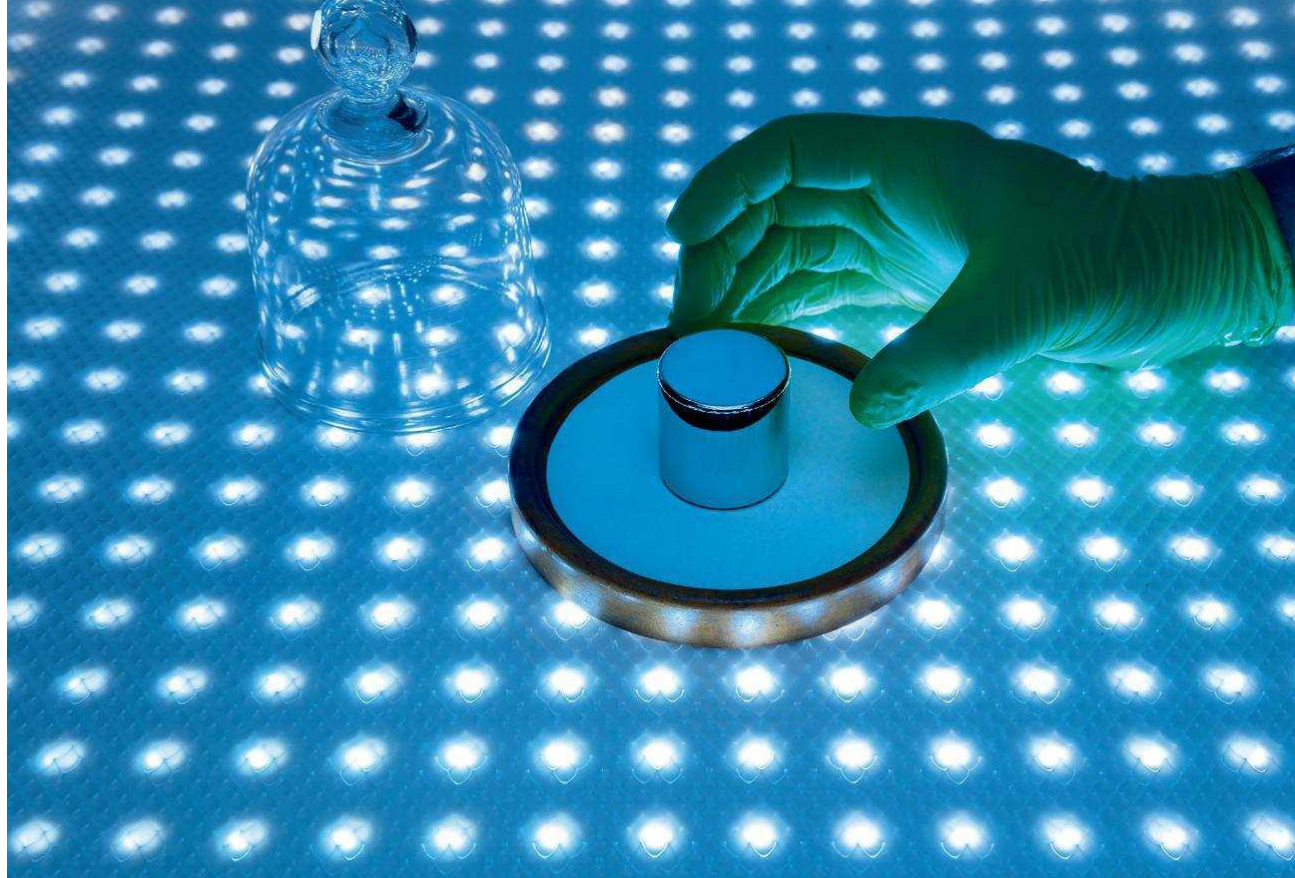
Perché si vuole mandare in pensione *Le Grand K*? Da anni i metrologi vogliono legare accuratezza e affidabilità dell'unità di misura internazionale della massa a una costante fondamentale dell'universo invece che a un beneamato pezzo di metallo risa-

IN BREVE

Dal 1889 il chilogrammo è stato definito facendo riferimento a un unico cilindro di platino-iridio conservato in una camera di sicurezza segreta a Parigi. È l'ultima unità di misura ancora legata a un manufatto fisico.

Ma il chilogrammo primigenio ideale perde massa, ed è uno dei motivi per cui la Conferenza generale dei pesi e delle misure ha deciso nel 2011 di ridefinire il chilogrammo associandolo a una costante della meccanica quantistica.

Quest'anno il processo di ridefinizione, che coinvolge i laboratori ufficiali di metrologia di cinque nazioni e alcune tra le misurazioni più complicate di tutte le aree scientifiche, entra nella fase finale.



lente all'epoca vittoriana. Ma c'è una ragione più urgente per questo cambiamento: sembra che Le Grand K stia perdendo massa. Circa ogni trent'anni viene rimosso dalla camera di sicurezza dove è conservato per essere pulito e confrontato con sei copie ufficiali, i *témoins*, ovvero i «testimoni», che sono conservati nella stessa camera di sicurezza. Quando nel 1889 si confrontarono i primi due testimoni con Le Grand K entrambi combaciavano con l'originale, ma misurazioni effettuate poco dopo la fine della seconda guerra mondiale e nuovamente nel 1992 mostrarono che le copie erano leggermente in sovrappeso rispetto a Le Grand K. Non sembra plausibile che le copie possano aver aumentato la propria massa mentre Le Grand K sia rimasto invariato, quindi la spiegazione più probabile è naturalmente un'altra. «Possiamo ipotizzare – dice il direttore del BIPM Michael Stock – che il prototipo internazionale del chilogrammo stia perdendo massa». Questa incertezza è una delle ragioni per cui nel 2011 la Conferenza generale dei pesi e delle misure – l'organo decisionale della Convenzione del metro, di cui fa parte anche il BIPM – ha deciso di stabilire una nuova unità di misura della massa.

Nessuno sa perché Le Grand K stia perdendo peso, ed è troppo prezioso per essere sottoposto a esami che possano rispondere al quesito. Il mistero presenta problemi pratici. Con i progressi tecnologici del prossimo decennio, le misurazioni di precisione della massa su scala molecolare e inferiore diventeranno consuete in un'ampia gamma di settori. «Vorremmo poter misurare masse di microgrammi con la precisione di almeno tre cifre decimali», spiega Pratt. «E con un chilogrammo manufatto i risultati su una scala ridotta possono diventare davvero imprecisi».

I problemi legati a Le Grand K non si limitano alle misurazioni della massa, dal momento che anche le unità di misura di forza ed energia derivano dal chilogrammo. «Siamo arrivati al punto in cui

K20, il chilogrammo nazionale statunitense, è attualmente calibrato con il prototipo internazionale del chilogrammo conservato a Parigi. Dopo la ridefinizione i metrologi useranno invece NIST-4.

a causa dei cambiamenti del prototipo internazionale del chilogrammo vedremmo cambiare i valori di costanti fondamentali», racconta Stock. «E questo non ha senso».

Il nuovo standard

Il chilogrammo è la più recente delle sette unità di misura fondamentali del sistema metrico a essere rimodernata, ma non sarà l'ultima. Oltre al chilogrammo, il sistema internazionale di unità di misura, o SI, include anche il metro, l'ampere (per la corrente elettrica), il secondo, la candela (una misura della luminosità intrinseca di una fonte di luce), la mole (che collega il peso di una sostanza al numero di atomi in essa contenuti) e il kelvin (per la temperatura).

Due delle unità del SI sono state ridefinite decenni fa. Nel 1983 il metro, precedentemente definito come la distanza tra due linee incise su una barra di platino-iridio conservata nella stessa camera di sicurezza di Le Grand K, era stato ridefinito come la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in un intervallo di tempo pari a $1/299.792.458$ di secondo. E con la comparsa degli orologi atomici negli anni sessanta il secondo – in precedenza definito come la frazione di un giorno – fu reimpostato in base alla frequenza specifica della radiazione elettromagnetica emessa da un atomo di cesio. Anche per mole, kelvin e ampere è in programma una revisione entro il 2018.

La situazione attuale dell'ampere è particolarmente bizzarra: la sua definizione ufficiale, che fa riferimento a due cavi elettrici unidimensionali di massa nulla e lunghezza infinita, è così astratta che non può essere replicata in laboratorio. Questo cambierà nel 2018 quando l'ampere sarà ridefinito basandosi sulla carica di un elettrone, un progresso reso possibile dallo sviluppo di dispositivi di nanotecnologia capaci di contare le singole particelle dotate di carica elettrica che si muovono lungo un circuito.

Cambiamenti delle unità di misura

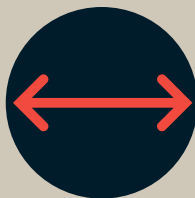
Il sistema internazionale di unità di misura (SI), anche noto come sistema metrico, si basa su sette unità fondamentali; altre 22 sono costruite a partire da queste sette. Nel 2018 il Comitato internazionale dei pesi e delle misure dovrebbe ridefinire la maggior parte delle unità fondamentali nella più grande revisione del sistema metrico dal 1960. Le sette unità fondamentali saranno legate a costanti naturali invarianti: il metro, il secondo e la candela rimarranno sostanzialmente invariati, ma le altre quattro saranno fondamentalmente riconcepiti.

Definite attualmente in termini di costanti fisiche

Unità: **metro**
Abbreviazione: **m**
Misura di: **lunghezza**

Definizione attuale (stabilita nel 1983):
Distanza percorsa dalla luce nel vuoto in un intervallo di tempo pari a $1/299.792.458$ di secondo.

Note storiche:
Quando l'Accademia francese delle scienze propose il sistema metrico, nel 1791, definì il metro come $1/10.000.000$ di un quarto della circonferenza terrestre, che a sua volta fu definito come un meridiano che va dal Polo Nord all'equatore passando per (e dove altro?) Parigi.



Unità: **secondo**
Abbreviazione: **s**
Misura di: **tempo**

Definizione attuale (stabilita nel 1967):
Il secondo è la durata di $9.192.631.770$ periodi della radiazione corrispondente alla transizione tra due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio-133.

Note storiche:
La definizione originale era quella familiare: il secondo era $1/86.400$ del «giorno solare medio», ovvero il tempo necessario alla Terra per una rotazione rispetto al Sole. La commissione diede al secondo la sua definizione attuale basata sulla meccanica quantistica nel 1967.



Unità: **candela**
Abbreviazione: **cd**
Misura di: **luminosità**

Definizione attuale (stabilita nel 1967):
Una candela è «l'intensità luminosa, in una direzione data, di una sorgente che emette radiazione monocromatica alla frequenza di 540×10^{12} hertz e la cui intensità radiante in quella direzione è di $1/683$ watt in uno steradiano», che è l'unità SI per l'angolo solido.

Note storiche:
Agli inizi del XX secolo Stati Uniti, Francia e Regno Unito definirono la candela riferendosi alla luminosità di una lampadina con filamento di carbonio. Nel 1933 la definizione fu resa più rigorosa dai metrologi basandola sulla radiazione di corpo nero, e poi adottata nel 1948; infine fu sostituita dall'attuale.



«Se pensiamo alle prossime ridefinizioni, potrebbero includere una candela basata sulla meccanica quantistica per quel che riguarda la luce e forse una definizione ottica per il secondo invece di una definizione alle microonde», commenta Alan Steele, il capo dei metrologi canadesi. «Ma ci vorranno almeno 15 anni, forse anche di più».

La ridefinizione del chilogrammo è il coronamento di un lavoro fatto per creare un vero sistema di misura universale, non legato a ristrette convenzioni terrestri. In linea di principio le nuove unità avrebbero senso per esseri intelligenti ovunque si trovino, sia qui che nella galassia di Andromeda. Sono tempi inebrianti per i metrologi: «È un'opportunità che capita una volta nella vita», dice Steele. «L'ultima volta che abbiamo provato a fare qualcosa di tanto fondamentale è stato quando è stato ridefinito il metro. È un gran momento per essere un metrologo, ve lo assicuro. Non è come raggiungere la pace nel mondo, o cose del genere, ma è comunque un gran bel traguardo».

La camera di sicurezza

Le Grand K non è stato il primo chilogrammo ufficiale: ha avuto un predecessore, realizzato durante la Rivoluzione francese, quando venne ideato l'intero sistema metrico decimale. Prima della rivoluzione quasi tutti i pesi e le lunghezze in Francia erano definiti da unità locali e i parametri di riferimento variavano da città a città, sovraccaricando la nazione con più di 700 unità di misura diverse. Per esempio, un *toise* corrispondeva a un *fathom* inglese, ovvero la distanza compresa tra le braccia di un uomo estese

al massimo. Ma un *toise* parigino (che era equivalente a 72 pollici o *pouce*) poteva non combaciare con quello di Marsiglia. I *savant*, come in Francia erano chiamati all'epoca gli scienziati, cercarono di porre fine al caos creando un nuovo sistema «per tutti e per sempre», per usare le parole di uno slogan immortalato su una lapide dell'epoca.

«L'idea che ebbero nel 1791 fu che gli standard dovessero essere basati su fenomeni naturali e invariabili», spiega Richard Davis, uno dei direttori, ora in pensione, del dipartimento deputato alla massa del BIPM, che è responsabile della manutenzione di Le Grand K. «Stiamo facendo la stessa cosa». La differenza è che ora i metrologi stanno considerando costanti naturali che sono davvero immutabili.

Siamo nell'ufficio di Stock nel Pavillon de Breteuil, un elegante edificio del XVII secolo sulla cima di una verdeggiante collina affacciata sulla Senna nel Parc de Saint-Cloud, una volta riserva di caccia dei reali francesi, dove il roseto di Maria Antonietta è curato con attenzione ancora oggi. È stato il quartier generale del BIPM fin dalla Convenzione del Metro nel 1875, un accordo firmato da 17 nazioni.

«Ha notato l'isola sulla sinistra quando ha attraversato il ponte per venire a Sèvres questa mattina?», domanda Davies. L'isola, racconta, una volta ospitava una fabbrica della Renault che produceva carri armati per l'esercito tedesco durante la seconda guerra mondiale. I bombardieri statunitensi la bersagliarono ripetutamente, e dopo che un bombardamento fece tremare il Pavillon de Breteuil, Le Grand K fu collocato in uno speciale contenitore an-

Devono essere ancora ridefinite in termini di costanti fisiche

Unità: **chilogrammo**

Abbreviazione: **kg**

Misura di: **massa**

Definizione attuale (stabilita nel 1889):

al momento il chilogrammo è ancora definito facendo riferimento a Le Grand K, il cilindro di platino-iridio nascosto in una camera di sicurezza a Parigi.



Ridefinizione proposta:

Se il progetto rispetta i tempi previsti, nel 2018 il chilogrammo sarà associato alla costante di Planck, una grandezza della meccanica quantistica che specifica l'ammontare di energia trasportata da un singolo quanto di luce, o fotone.

Unità: **ampere**

Abbreviazione: **A**

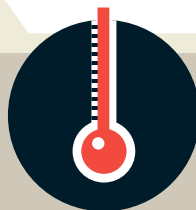
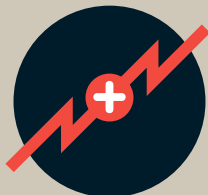
Misura di: **corrente elettrica**

Definizione attuale (stabilita nel 1946):

L'attuale definizione di ampere fa riferimento a «due conduttori lineari paralleli, di lunghezza infinita e sezione trasversale circolare trascurabile... posti a un metro di distanza nel vuoto» ed è impossibile da replicare in laboratorio.

Ridefinizione proposta:

L'ampere verrebbe semplificato fissando il valore numerico per la carica trasportata da un protone (la costante fondamentale nota come carica elementare).



Unità: **kelvin**

Abbreviazione: **K**

Misura di: **temperatura**

Definizione attuale (stabilita nel 1967):

Oggi un kelvin è pari a «a $1/273,16$ della temperatura termodinamica del punto triplo dell'acqua», cioè la combinazione di temperatura e pressione a cui ghiaccio, vapore e acqua liquida possono coesistere.

Ridefinizione proposta:

Basare il kelvin su un valore fissato per la costante di Boltzmann, che collega l'energia cinetica media delle molecole di un gas con la sua temperatura assoluta, migliorerebbe le misurazioni per temperature estremamente basse ed estremamente alte.

Unità: **mole**

Abbreviazione: **mol**

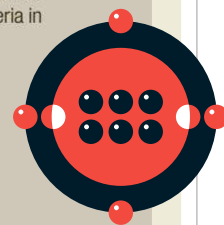
Misura di: **quantità di sostanza**

Definizione attuale (stabilita nel 1971):

«La mole è la quantità di sostanza di un sistema che contiene tante unità elementari quanti sono gli atomi in $0,012$ chilogrammi di carbonio-12».

Ridefinizione proposta:

Eliminare il collegamento tra mole e chilogrammo, e definire la mole fissando un valore numerico per la costante di Avogadro, che è il numero di molecole, atomi, o qualsiasi altra piccola quantità discreta di materia in una mole di sostanza.



ti-vibrazioni. Sebbene i *témoin* fossero protetti in una cassaforte sotterranea nella Banca di Francia per la maggior parte della guerra, la Convenzione del Metro specificava che Le Grand K deve sempre rimanere nel BIPM.

Nel 1946, quando Le Grand K fu rimosso dalla camera di sicurezza dopo la guerra per ripulirlo e confrontarlo con le sei copie, si scoprì che era di 30 microgrammi più leggero dei *témoin*. All'epoca della successiva pulizia, 45 anni dopo, la differenza era aumentata a 50 microgrammi, il peso dell'ala di una mosca.

«Cinquanta microgrammi in un secolo», dice Stock mentre guardiamo il grafico dei cambiamenti sul computer del suo ufficio. «Come potete vedere la differenza è di poco conto». Per ora, dice, la discrepanza non presenta difficoltà pratiche. «Ma se continua così, un giorno avremo problemi».

Nel campo delle nanotecnologie 50 microgrammi è una grandezza enorme. Inoltre l'incertezza sul valore della massa del chilogrammo si propagherebbe in una lunga catena di altre unità fondamentali: l'unità metrica della forza, il newton, è definita basandosi sul chilogrammo, e a sua volta il newton è usato per definire il joule, l'unità di misura dell'energia, che a sua volta è usato per definire il watt, e così via. In definitiva, un piccolo dubbio macchierebbe quasi ogni misurazione del mondo fisico.

Ripulire e confrontare Le Grand K con le masse di controllo non è un compito di ordinaria amministrazione, specialmente perché è stato svolto solo quattro volte dal 1889. Le Grand K deve prima essere tolto dal caveau, la camera di sicurezza, e questa operazione richiede la presenza di tre persone per aprire tre serrature disposte

verticalmente. Dentro la camera di sicurezza c'è una grande cassaforte a combinazione che contiene Le Grand K, che si trova sotto tre campane di vetro, una contenuta nell'altra. La cassaforte protegge anche le sei copie. Solo tre persone al mondo hanno le chiavi della camera di sicurezza: il direttore del BIPM, il direttore degli Archivi nazionali a Parigi e il presidente del Comitato internazionale dei pesi e delle misure (CIPM), che supervisiona il lavoro del BIPM. Dato che ogni chiave è diversa, per aprire la camera di sicurezza devono esserci tutti e tre i funzionari.

«In tutta la storia della Convenzione del Metro del 1875 sono solo il secondo non europeo a essere stato eletto presidente del CIPM», dice Barry Inglis, un ingegnere elettrico australiano. «Ho chiesto loro che cosa succederebbe se tornando a casa il mio aeroplano precipitasse nell'Oceano Indiano: «come ve la cavereste, ragazzi?». Ma sono sicuro che ci sia un fabbro che riuscirebbe ad aprire quella vecchia serratura senza troppa fatica».

Pochi tra i dipendenti del BIPM hanno visto Le Grand K e ci sono anche pettegolezzi secondo cui quello immortalato nelle foto ufficiali sia in realtà una controfigura. «L'ho visto una volta», racconta Susanne Picard, che lavora al BIPM dal 1987. I tre titolari delle chiavi aprono la camera di sicurezza una volta all'anno per guardare – ma non toccare – Le Grand K ed essere sicuri che, insomma, sia ancora lì.

Dopo essere entrati all'interno del rifugio di Le Grand K, un tecnico afferra il cilindro brillante con pinze foderate di camoscio e lo porta alla stazione di pulizia, dove è strofinato con un panno di camoscio intriso di alcool ed etere, e successivamente risciacquato

con un getto di acqua doppiamente distillata. Infine una folata di azoto elimina le rimanenti gocce d'acqua. Tutto il processo dura circa un'ora. Il BIPM ha sperimentato diversi metodi di pulizia su masse di prova, per esempio usando radiazioni ultraviolette, ma questi metodi rendono la lega metallica troppo pulita. «Sembrano rimuovere più sporcizia del nostro metodo», spiega Stock. «Ma dopo la massa è instabile, perché è così pulita che la superficie diventa altamente reattiva». E questo avrebbe solo l'effetto di rendere Le Grand K un riferimento meno affidabile, quindi il BIPM continua a usare il suo metodo a base di panno di camoscio e risciacquo con acqua.

Dopo il bagno, Le Grand K e i *témoins* sono portati in una stanza pulita e posti su un dispositivo chiamato comparatore di massa, uno strumento del valore di 500.000 dollari che riesce a misurare masse dell'ordine di un microgrammo. Il comparatore di massa e dieci cosiddetti chilogrammi standard operativi sono gli stakanovisti del dipartimento del BIPM deputato alla massa, dato che sono usati per buona parte delle calibrazioni quotidiane, mentre Le Grand K e i *témoins* sono tirati fuori solo una volta ogni qualche decennio per verificare i prototipi del chilogrammo di differenti nazioni.

Quando la conversazione con Davies e Stock volge al termine, chiedo loro se è possibile vedere l'esterno della camera di sicurezza dove si trova Le Grand K: so che non c'è nessuna speranza di vedere proprio il regale cilindro campione. I due scoppiano a ridere scuotendo la testa: «No, no, no, no!».

«Non è la prima volta che ci è stato chiesto», dice Davies.

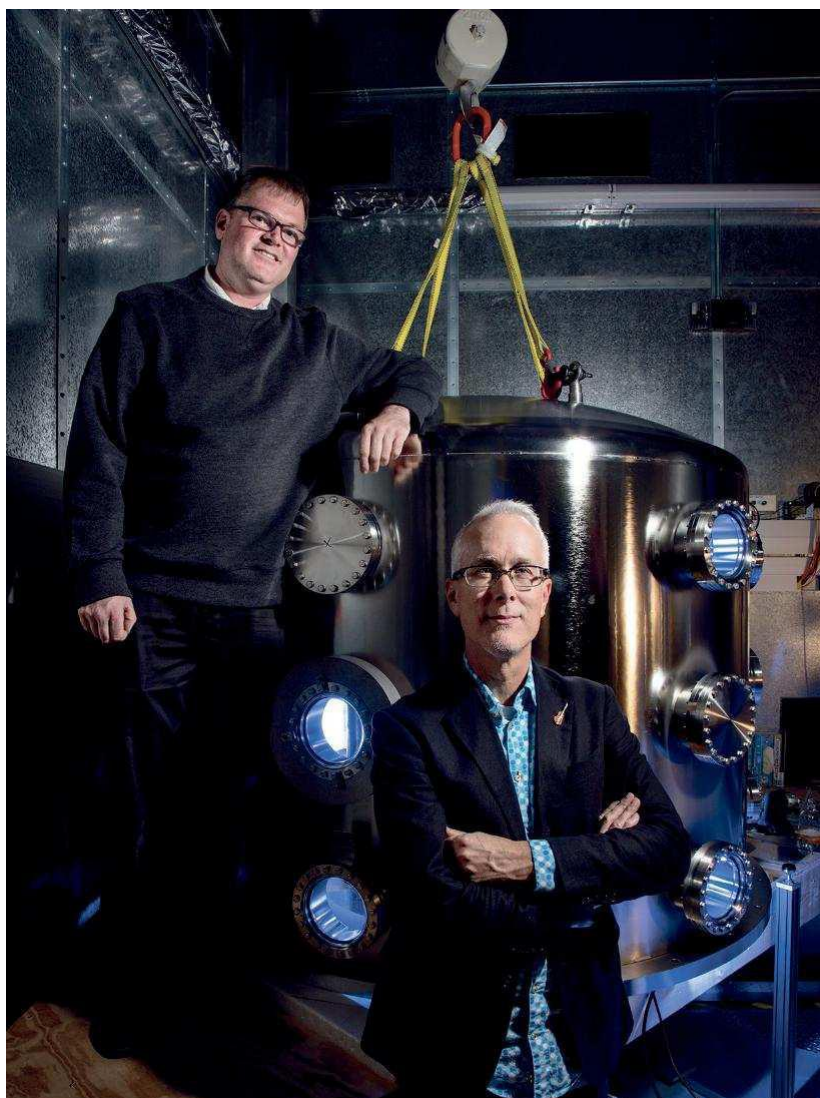
«Ma è qui nei sotterranei, vero?» domando.

«Sì – risponde Davies – questo è quanto è di dominio pubblico».

Una misurazione complicata

Presto Le Grand K sarà una curiosità storica, e la nuova definizione internazionale di massa sarà basata sulla costante di Planck, che comprende sia l'unità di energia sia quella di tempo, e può essere espressa in termini di massa grazie all'equazione $E = mc^2$. Come G , la costante di gravitazione universale, anche la costante di Planck emerge dalla teoria, ma il suo valore numerico può essere determinato solo tramite esperimenti. E grazie a strumenti più evoluti le nostre misurazioni delle costanti naturali stanno migliorando sempre di più.

Per effettuare la transizione verso il nuovo standard quantistico, il BIPM ha concepito una strategia in due parti: prima i laboratori nazionali di metrologia di cinque nazioni diverse fisseranno un valore numerico per la costante di Planck, peseranno i loro chilogrammi nazionali in termini di questo valore e poi vedranno quanto combaceranno le misurazioni di questi chilogrammi. È proprio l'esperimento condotto dal BIPM l'esta-



I metrologi Jon Pratt e Stephan Schlamming insieme alla bilancia di Kibble NIST-4. Si vede la campana a vuoto che pesa più di 450 chilogrammi.

te scorsa. Supponendo che i risultati, che dovrebbero essere noti quest'anno, siano soddisfacenti, i partecipanti di questo studio invertiranno il processo e useranno i loro chilogrammi nazionali nei loro rispettivi laboratori per calibrare finemente la loro misurazione della costante di Planck. Il nuovo valore della costante di Planck così ottenuto sarà usato per ridefinire in modo permanente il chilogrammo.

Gran parte di questo lavoro userà uno strumento estremamente complesso chiamato bilancia di Kibble. Fino all'anno scorso la bilancia di Kibble era universalmente nota come bilancia di Watt, ma i metrologi hanno deciso di cambiarle il nome dopo la morte del suo inventore, il fisico britannico Bryan Kibble, avvenuta nel 2016. Gli esperimenti con le bilance di Kibble sono così difficili che nel 2012 la rivista «Nature» li ha inseriti tra le cinque attività più difficili in fisica, allo stesso livello della rilevazione del bosone di Higgs e delle onde gravitazionali.

Un giorno di maggio dello scorso anno, Stephan Schlamming, del NIST, mi ha condotto fino all'edificio bianco a due piani che si trova ai margini di un bosco di 235 ettari che appartiene all'istituto, e che ospita la più vecchia delle sue due bilance di Kib-

ble, ora messa praticamente sotto naftalina dato il completamento di un nuovo modello nel 2014. «È come nel telefilm *La casa nella prateria*», scherza Schlamminger mentre ci fermiamo di fronte alla struttura isolata. È qui che si effettua la maggior parte delle misurazioni del NIST che riguardano la costante di Planck, e il nuovo modello funzionerà più o meno nella stessa maniera.

Ogni somiglianza con una fattoria svanisce quando entriamo. L'interno sembra lo scenario di una storia *steampunk*, con le pareti ricoperte di rame fino al soffitto del secondo piano. «Vede tutti quegli attrezzi in ottone?», dice Schlamminger «Non c'è nulla in ferro qui». Rame e ottone proteggono gli strumenti dai campi magnetici esterni, ma i campi magnetici generati all'interno dell'edificio sono così potenti da cancellare le carte di credito. Al centro di una stanza al primo piano c'è un'alta colonna di sostegno con alla base un magnete superconduttore che viene raffreddato con elio liquido quando è in azione.

Il meccanismo vero e proprio della bilancia è al secondo piano e consiste di una ruota di alluminio di mezzo metro montata verticalmente con i piatti della bilancia appesi a cavi da ambo i lati. Durante le misurazioni, un piatto della bilancia contiene una massa di un chilogrammo e una bobina di cavo è sospesa direttamente sotto questo stesso piatto da tre aste di quattro metri l'una. Il piatto sull'altro lato della bilancia contiene un contrappeso e un motore elettrico. Per calcolare tutti i valori usati nell'equazione che collega la massa alla costante di Planck sono necessarie due modalità operative distinte. In modalità «peso», la forza gravita-

sità, osserva, il dispositivo gli ricorda qualcosa di un'altra epoca. Quando il suo gruppo stava misurando la costante di Planck c'erano valvole da aprire e chiudere in un preciso ordine, e bisognava controllare costantemente la pressione all'interno del serbatoio di elio liquido. «Sembrava di guidare un motore a vapore – aggiunge Schlamminger – e invece stavamo facendo esperimenti per misurare grandezze della meccanica quantistica».

Au revoir, Le Grand K

Che cosa succederà in seguito dipenderà dai risultati degli esperimenti dello scorso anno. Le misurazioni del chilogrammo effettuate da tre dei cinque laboratori nazionali di metrologia partecipanti devono coincidere con uno scarto massimo di 50 microgrammi, ovvero l'attuale incertezza pari all'ala di una mosca nella massa di Le Grand K. Dopo che saranno pubblicati i risultati dello studio pilota, il lavoro per la ridefinizione inizierà in modo serio.

Se tutto andrà bene il chilogrammo sarà quindi ridefinito in base alla costante di Planck. Il BIPM ha imposto vincoli molto stretti per questa nuova definizione: non solo tutte le misurazioni della costante di Planck devono coincidere con uno scarto massimo di 50 parti su un miliardo, ma almeno una deve avere uno scarto inferiore a 20 parti per miliardo, un livello che i canadesi hanno già sorpassato. Affinché la nuova definizione sia ufficializzata nel 2018, tutte le nuove misurazioni della costante di Planck dovranno essere accettate per la pubblicazione entro il 1° luglio 2017.

E che cosa accadrà a Le Grand K? Rimarrà nella sua camera di sicurezza. A ogni modo, data la complessità delle bilance di Kibble, i manufatti del chilogrammo non saranno completamente abbandonati. Invece di eseguire regolarmente misurazioni complicate con una bilancia di Kibble, nei prossimi decenni per le attività quotidiane i laboratori di metrologia nel mondo continueranno a usare una nuova generazione di proto-

tipi che il BIPM sta già preparando. Ma saranno calibrati usando bilance di Kibble e non Le Grand K.

È la fine della storia? Adesso abbiamo davvero un chilogrammo per tutti e per sempre? Stock preferisce non sbilanciarsi.

«Uno dei miei predecessori, un premio Nobel che si chiamava Charles Edouard Guillaume, credeva che l'attuale chilogrammo sarebbe stato usato per 10.000 anni», dice. «Ovviamente era una previsione esageratamente ottimista. Non sono certo che questa sarà l'ultima ridefinizione, ma dovrebbe durare per un po' di tempo. Ma magari non 10.000 anni».

PER APPROFONDIRE

The Measure of All Things: The Seven-Year Odyssey and Hidden Error That Transformed the World. Alder K., Free Press, 2002.

The Five Toughest Physics Experiments Frontier Experiments: Tough Science. Jones N., in «Nature», Vol. 481, pp. 14-17, 5 gennaio 2012. www.nature.com/news/frontier-experiments-tough-science-1.9723.

How to Build Your NIST D.I.Y Watt Balance. Video, National Institute of Standards and Technology, 26 agosto 2015. www.youtube.com/watch?v=oST_krdqLPQ.

Atlas Obscura, pagina web relativa all'ultimo metro originale a Parigi: www.atlasobscura.com/places/the-last-original-standard-metre.

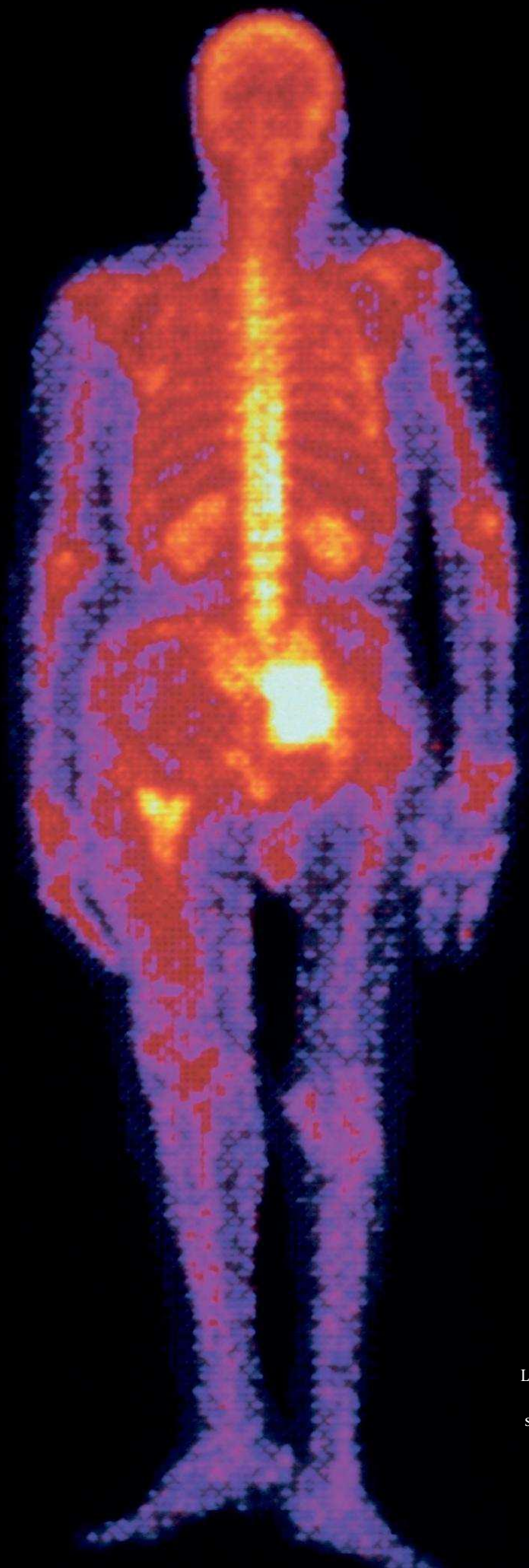
Questioni di peso. Robinson I., in «Le Scienze» n. 462, febbraio 2007.

Gli esperimenti con le bilance di Kibble sono così complicati che «Nature» li ha inseriti tra le cinque attività più difficili in fisica, allo stesso livello della rilevazione del bosone di Higgs e delle onde gravitazionali

zionale verso il basso sulla massa di test è compensata da un campo magnetico generato facendo passare una corrente attraverso la bobina sospesa sotto il piatto della bilancia. In modalità «velocità» la massa di test è rimossa dal piatto della bilancia, e la bobina è sollevata dal motore nel piatto opposto a una velocità costante attraverso un campo magnetico generato dal magnete superconduttore della bilancia, che induce una differenza di potenziale nella bobina in movimento.

La corrente misurata in modalità peso e la tensione indotta in modalità velocità sono quindi inseriti in equazioni della teoria quantistica che collegano corrente, tensione e resistenza elettrica alla costante di Planck. In breve, a partire da una massa nota di un chilogrammo la bilancia di Kibble riesce a calcolare la costante di Planck. Successivamente, avendo a disposizione un valore accurato per la costante di Planck, la bilancia può essere usata per misurare masse senza aver bisogno di alcun tipo di manufatto fisico.

Per ottenere risultati accurati, Schlamminger e colleghi devono anche tenere conto delle oscillazioni locali nella pressione atmosferica e nella forza di gravità. Bisogna anche considerare la precessione degli equinozi e le maree. «Se i calcoli non venissero corretti in base alle maree – spiega Schlamminger – si avrebbe un errore di 100 parti per miliardo». Nonostante la sua comples-



Un aiuto prezioso.

Le scansioni diagnostiche per il cancro alla tiroide o alle ossa, come questa, sono ottenute grazie a un raro isotopo chiamato tecnezio-99m.

Medicina alla cieca

Le scansioni diagnostiche di milioni di pazienti dipendono da un raro isotopo radioattivo di un unico elemento chimico. Ma i vecchi reattori nucleari che lo producono stanno chiudendo i battenti

di Mark Peplow

L'uomo con gli atomi radioattivi nelle vene sembra calmo. Su una barella al Vancouver General Hospital, resta fermo sdraiato mentre lo infilano in uno scanner a ciambella, che emette un continuo ronzio. Il piede gli fa male, e la macchina scatta immagini nitide in 3D di ossa e tessuto molle all'interno grazie a quegli atomi; la loro radiazione è più luminosa alla lesione, dove c'è un aumento di afflusso di sangue.

Questa sorta di «segnalazione luminosa» non è usata solo per illuminare i piedi. Più di 30 milioni di volte all'anno, in tutto il mondo, scansioni che usano questi atomi tracciano il battito irregolare di cuori difettosi, scoprono tumori letali ed esplorano cervelli devastati da ictus. Le immagini si basano su un oscuro isotopo chiamato tecnezio-99m, usato in un processo di *imaging* chiamato «tomografia computerizzata a emissione di fotone singolo». Una volta iniettato, il tecnezio offre ai medici una vista impareggiabile dell'organismo, permettendo di individuare lesioni e malattie e di salvare la vita ai pazienti. Queste immagini possono mostrare dettagli più sottili rispetto ad altri esami, e la dose di radiazioni è estremamente bassa e sicura.

Ora queste immagini preziose sono a rischio. Gli atomi radioattivi che attraversano il piede del nostro paziente hanno

origine in un vecchio reattore nucleare situato a migliaia di chilometri di distanza, a Chalk River, nell'Ontario. Il 31 ottobre 2016 il reattore ha smesso di produrre la materia prima per l'isotopo. Da quel momento il Nord America è rimasto senza fonti casalinghe di questo strumento medico vitale, e nel mondo è venuto a mancare il 20 per cento della produzione complessiva. Chalk River chiuderà definitivamente tra pochi anni. E non è tutto.

La quasi totalità delle forniture mondiali dipende da soli sei reattori di ricerca, di cui quattro hanno più di 50 anni e sono sempre più soggetti a guasti. Due soli reattori, in Belgio e nei Paesi Bassi, coprono ormai la metà della produzione globale, e cesseranno l'attività nel prossimo decennio. Sono in programma nuovi impianti nucleari, ma il loro completamento potrebbe richiedere più di dieci anni. Lo scorso settembre, le National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine degli Stati Uniti hanno lanciato un allarme con un rapporto secondo cui c'è una possibilità «considerabile» di carenze nel futuro prossimo.

I medici sono preoccupati. «È qualcosa di cui abbiamo bisogno su base giornaliera», dichiara Eric Turcotte, specialista di medicina nucleare dell'Università di Sherbrooke, in Québec. Questi esami sono particolarmente utili per individuare tumori alle ossa, fratture – nel piede del paziente i medici cercavano piccole fratture – e ostruzioni nelle arterie di cardiopatici. Spesso sono prescritti a persone

IN BREVE

Un unico isotopo radioattivo, il tecnezio-99m, è indispensabile per eseguire esami medici salvavita.

Le forniture mondiali si stanno esaurendo, a

causa della chiusura degli obsoleti reattori nucleari che producono il materiale da cui si ricava questo isotopo.

I ricercatori di diversi paesi cercano di

compensare questa scarsa disponibilità sviluppando nuovi metodi produttivi che sono basati su acceleratori di particelle e altre macchine.

che lamentano dolori al petto o altri sintomi riconducibili a malattie vascolari. Altre tecniche producono immagini più confuse, meno precise, oppure richiedono dosi superiori di radiazioni, che pongono un pericolo di danni più serio. Benjamin Chow, cardiologo dell'University of Ottawa Heart Institute, spiega che una carenza costringerebbe i medici a ripiegare su analisi meno accurate, aumentando i rischi per i pazienti, o a rinunciare ai test.

Inoltre, una produzione concentrata in pochi siti dà luogo a una catena di distribuzione più esposta a interruzioni. Quasi tutto l'isotopo decade in un giorno, e non può essere stoccato. Ogni dose a vita breve per un paziente deve essere prelevata da un contenitore che ne conserva la sorgente: un isotopo che dura più a lungo, il molibdeno-99. Le scorte di questo materiale devono essere consegnate in aereo a mezzo mondo ogni pochi giorni dai reattori che lo producono. Maltempo e annullamento dei voli possono portare alla cancellazione degli esami. «Pensate a che cosa può succedere se chiude un aeroporto», commenta François Bénard, scienziato clinico della BC Cancer Agency, nella British Columbia.

Il ciclo di produzione dell'isotopo solleva anche un altro problema: il terrorismo nucleare. Per ottenere il molibdeno-99, la maggior parte dei reattori impiega uranio altamente arricchito (HEU) potenzialmente utile anche per bombe atomiche. A livello globale l'intenzione è abbandonare l'impiego di HEU entro il 2020, perché persone pericolose e Stati canaglia vorrebbero impossessarsene. Convertire i reattori all'uranio a basso arricchimento (LEU) causerebbe tuttavia ulteriori rallentamenti, oltre al fatto che i reattori LEU produrrebbero quantità inferiori di molibdeno-99.

Per scongiurare questa crisi imminente, ricercatori statunitensi e canadesi fanno a gara per sviluppare tecnologie nuove per produrre molibdeno-99 e tecnezio-99m senza reattori nucleari, ma con più agevoli acceleratori di particelle e altre macchine. Queste tecniche non solo eviterebbero una carenza, ma sarebbero anche più economiche e produrrebbero meno scorie radioattive. Ora che la produzione globale sta diminuendo, i ricercatori potranno scoprire se le loro alternative sono all'altezza della sfida.

Se le scorte scarseggiano

I medici hanno già avuto un primo, amaro assaggio di che cosa accade quando il molibdeno-99 finisce. Tra 2009 e il 2010, i reattori di Canada e Paesi Bassi hanno interrotto la produzione per lunghi periodi, provocando una carenza globale che ha costretto i medici a trovare test diagnostici alternativi. «La crisi del 2009 è stata un campanello d'allarme», ricorda Sally Schwarz, presidente della Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging. «I test diagnostici non potevano essere eseguiti, a discapito dei pazienti. Non vogliamo più trovarci in quella situazione».

Un'alternativa diffusa agli esami cardiologici con tecnezio-99m è l'impiego di un altro radioisotopo, il tallio-201, che però produce immagini più confuse e raddoppia la dose di radiazioni a cui sono esposti i pazienti, come spiega Venkatesh L. Murthy, dell'Università del Michigan, specializzato in tecniche di imaging del cuore. E altri metodi non radioattivi, come l'ecocardiografia, sono meno precisi. A suo parere il tecnezio-99m è un ottimo compromesso tra risoluzione, sicurezza e costi.

Allarmato dagli effetti della carenza di tecnezio-99m, il governo canadese ha avviato un piano da 45 milioni di dollari, l'Isotope Technology Acceleration Program (ITAP), per sviluppare tecniche alternative di produzione. Il progetto cardine di questo programma potrebbe diventare operativo entro la fine di quest'anno.

Invece di un enorme reattore, la nuova tecnologia impiega un

Mark Peplow, giornalista scientifico, ha scritto un articolo sull'impiego delle nanotecnologie in medicina pubblicato nel numero di giugno 2015 di «Le Scienze».



piccolo acceleratore di particelle, un ciclotrone, che può trovare spazio nel seminterrato di un ospedale. Il ciclotrone fa collidere protoni con un bersaglio costituito da un isotopo chiamato molibdeno-100, producendo tecnezio-99m. La breve emivita dell'isotopo significa che ogni ciclotrone può rifornire solo un'area limitata. Ma la maggior parte delle grandi città canadesi ospita già macchine simili, quindi dovrebbe essere possibile estendere questa soluzione a tutto il paese, dice Paul Schaffer, direttore associato di laboratorio ed ex capo della divisione di medicina nucleare di TRIUMF, il principale centro per i ciclotroni del Canada, che ha sviluppato il nuovo metodo. TRIUMF, con sede a Vancouver, ha effettuato test preliminari per dimostrare che in sei ore un ciclotrone può produrre una quantità di tecnezio-99m sufficiente a coprire il fabbisogno della British Columbia – circa 500 scansioni al giorno – che conta quasi 5 milioni di abitanti.

Il ciclotrone, del diametro di 2 metri, è nel caveau della BC Cancer Agency di Vancouver, protetto da una porta d'acciaio. Due sottili tubi metallici si protendono dalla macchina, trasportando fasci di protoni che viaggiano a un quinto della velocità della luce. All'altra estremità c'è il bersaglio: una sottile piastra di dieci centimetri, rivestita di molibdeno-100 e chiusa in un cilindro di alluminio. La piastra è bombardata per sei ore, per trasformare parte del molibdeno-100 in tecnezio-99m. Poi un tubo ad aria compressa spara la piastra in una cella schermata con il piombo in un'altra stanza, dove gli operatori separano e purificano il tecnezio-99m. Il risultato è una fialetta di liquido limpido con una quantità di isotopo sufficiente per centinaia di esami.

Vancouver General Hospital e BC Cancer Agency stanno concludendo uno studio clinico per testare l'impiego del tecnezio in test su pazienti. Il processo di produzione dell'isotopo è avviato in genere nelle prime ore del mattino, e le infusioni ai pazienti iniziano alle 13.00. I risultati ottenuti finora indicano che il tecnezio generato con il ciclotrone ha lo stesso grado di sicurezza ed efficacia degli isotopi ricavati dai contenitori di molibdeno-99.

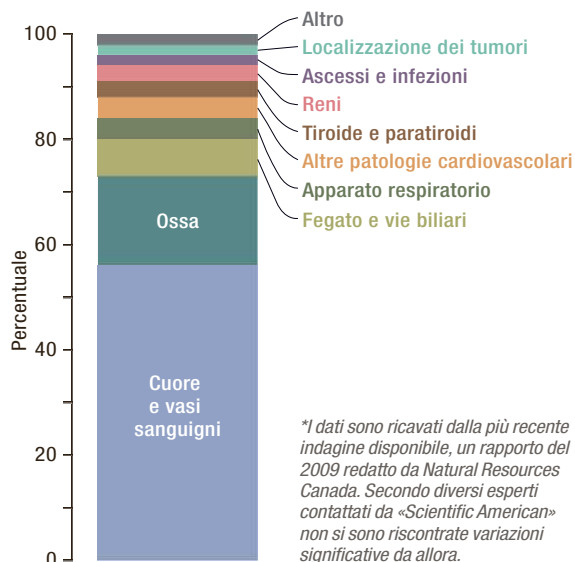
L'anno scorso TRIUMF e altri partner di ITAP hanno fondato un'azienda per installare questa tecnologia su altri ciclotroni. In tutto il mondo ci sono già circa 500 ciclotroni medici capaci di generare fasci di protoni abbastanza potenti da produrre tecnezio-99m con questo sistema, oltre ai loro attuali prodotti, come isotopi per le tomografie a emissione di positroni. Secondo Schaffer, questa base già esistente è un grande vantaggio: il prezzo di un ciclotrone medico nuovo si aggira sui 5 milioni di dollari, mentre la spesa per riconfigurare una macchina esistente è solo a un decimo di questa cifra. Nel 2014 la British Nuclear Medicine Society ha individuato in questa tecnologia la soluzione migliore per produrre tecnezio-99m, e Schaffer ritiene che l'intero fabbisogno del Canada possa essere coperto con 12-24 ciclotroni.

Passi avanti

A sud, negli Stati Uniti, i ciclotroni non suscitano però lo stesso entusiasmo. E nemmeno il tecnezio. Il problema, spiega Schaffer, è che gli ospedali statunitensi sono stati tra i primi a costruire ciclotroni medici, e i loro modelli più vecchi non sono in grado di raggiungere i livelli di energia richiesti oggi.

Le applicazioni degli isotopi

Il tecnezio-99m trova impiego ogni anno in circa 30 milioni di esami medici. Più della metà di questi accertamenti servono a individuare malattie cardiovascolari potenzialmente letali, e i restanti a rilevare tumori ossei, malattie renali e di altra natura.*



Per questo la National Nuclear Security Administration del Department of Energy degli Stati Uniti appoggia società che propongono macchine differenti. Una di queste, la NorthStar Medical Radioisotopes di Madison, nel Wisconsin, vuole usare un acceleratore lineare di elettroni (LINAC) per generare raggi X ad alta energia che sottraendo un neutrone al molibdeno-100 lo trasformano in molibdeno-99, che decade poi in tecnezio. I LINAC possono ottenere più facilmente le autorizzazioni necessarie rispetto ai reattori nucleari, costano meno dei ciclotroni e si possono acquistare «in pronta consegna», spiega Carl Ross, fisico in pensione ed ex collaboratore del National Research Council del Canada, dove si occupava di acceleratori lineari. (La Canadian Isotope Innovations, nata dai finanziamenti di ITAP, segue un approccio simile, ma non ha ancora raggiunto risultati confrontabili.)

Nonostante tutti i vantaggi, gli acceleratori lineari standard producono concentrazioni di molibdeno-99 più basse rispetto ai reattori. NorthStar ha sviluppato quindi un sistema per separare tecnezio-99m dalla miscela di isotopi del molibdeno ottenuta con i suoi LINAC. La tecnologia, chiamata «RadioGenix», pompa la miscela in una colonnina di resina che assorbe solo tecnezio. Gli isotopi del molibdeno possono dunque essere usati per un altro ciclo di produzione, e il tecnezio puro è rimosso dalla colonnina con un lavaggio salino. L'azienda conta di ricevere entro quest'anno l'approvazione per l'impiego clinico del suo sistema.

Un'altra soluzione, forse ancora più radicale, è proposta da SHINE Medical Technologies di Monona, nel Wisconsin, che punta a produrre molibdeno-99 bombardando una miscela liquida di LEU con neutroni generati in un LINAC dalla collisione tra deuterio e

trizio. La fusione di questi due isotopi pesanti dell'idrogeno genera un altro elemento, l'elio, e libera un neutrone. Questi neutroni possono quindi innescare le reazioni di fissione nel bersaglio di LEU, formando molibdeno-99. L'azienda sostiene che questo metodo può produrre concentrazioni di molibdeno-99 compatibili con gli attuali sistemi di trasporto dell'isotopo e di separazione del tecnezio-99m. (In inglese il processo di estrazione è detto anche *milking*, «mungitura», per cui il contenitore del molibdeno è chiamato colloquialmente *moly cow*, «mucca di molibdeno».) Nel febbraio 2016 SHINE ha ottenuto l'autorizzazione a costruire l'impianto di produzione dalla U.S. Nuclear Regulatory Commission e spera di riuscire ad avviare la distribuzione entro il 2020.

Questione di prezzo

L'impiego di tecnologie *smart* non è però garanzia di successo. I costi saranno determinanti. Come sostiene Bénard, «il prodotto deve avere prezzi competitivi per essere adottato dagli ospedali».

In Nord America, una dose di tecnezio-99m generato con i metodi attuali costa da 20 a 25 dollari. Il prezzo è molto inferiore al costo reale di produzione, anche perché i governi hanno pagato una larga quota di combustibile nucleare, smaltimento dei rifiuti e costruzione dei reattori. «Siamo diventati dipendenti dai sussidi governativi», dice Schaffer. «È modello non sostenibile».

Con l'introduzione di nuove tecnologie e controlli sulla catena di distribuzione affidati in misura maggiore a enti privati e locali, produttori e governi preparano un adeguamento del prezzo del tecnezio-99m per coprire le spese di mantenimento della catena. Nei prossimi anni gli ospedali della British Columbia si attendono un aumento della spesa del 40 per cento, spiega Schaffer.

Prezzi basati sulla piena copertura dei costi potrebbero aiutare le *start-up* a decollare e a restare in attività. Le previsioni dei mercati sono però contrastanti. Da un lato, l'invecchiamento della popolazione nei paesi sviluppati dovrebbe incrementare la richiesta di quegli esami cardiologici in cui eccelle il tecnezio-99m. E il mercato cinese è in rapida crescita.

Dall'altro lato, secondo i dati dell'OCSE (Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico) negli ultimi anni in molti paesi la domanda di tecnezio-99m è diminuita. La ragione? Le carenze del 2009-2010 hanno indotto gli ospedali a ridurre la quantità di tecnezio in ciascuna dose. La qualità delle immagini è rimasta comunque elevata grazie all'uso di programmi di imaging più intelligenti. L'OCSE stima quindi che l'adozione di nuovi reattori e metodi potrebbe portare a una sovrabbondanza di tecnezio-99m e a un abbassamento dei prezzi entro il 2021.

Molti addetti ai lavori dubitano comunque che i reattori sostitutivi possano essere attivati nei tempi previsti. «Se ci affidiamo solo ai reattori, saremo di nuovo nei guai», sostiene Bénard, della BC Cancer Agency. Per continuare ad avere immagini, dice, devono entrare in gioco le nuove tecnologie. ■

PER APPROFONDIRE

Lessons from the Tc-99m Shortage: Implications of Substituting Tl-201 for Tc-99m Single-Photon Emission Computed Tomography. Small G.R. e altri, in «Circulation: Cardiovascular Imaging», Vol. 6, n. 5, pp. 683-691, settembre 2013.

Cardiac Stress Testing and the Radiotracer Supply Chain: Nuclear Freeze. Murthy V.L. e altri, in «JAMA Cardiology», Vol. 1, n. 5, pp. 616-617, 1° agosto 2016.

Molybdenum-99 for Medical Imaging. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, National Academies Press, 2016.

Tomografia a emissione di positoni. Ter-Pogossian M.M., Raichle M.E. e Sobel B.E., in «Le Scienze» n. 148, dicembre 1980.

EVOLUZIONE

Il paradosso dell'



di Herman Pontzer

attività fisica

Gli studi sul consumo energetico del motore umano aiutano a spiegare perché l'attività fisica è poco efficace per tenere sotto controllo il peso corporeo e come la nostra specie abbia acquisito alcuni dei suoi più specifici tratti distintivi

IN BREVE

L'opinione comune è che le persone fisicamente più attive brucino più calorie di quelle meno attive.

Ma gli studi più recenti dimostrano che i cacciatori-raccoglitori tradizionali, che conducono una vita di duro lavoro fisico, bruciano lo stesso numero di calorie delle persone che hanno accesso alle moderne comodità.

La scoperta che la spesa energetica umana è strettamente vincolata solleva domande su come, negli esseri umani, si siano evoluti un grande cervello e altri tratti energeticamente costosi.

Il confronto con la spesa energetica delle grandi scimmie antropomorfe fa pensare che il meccanismo metabolico umano si sia evoluto in modo da poter svolgere una maggiore quantità di lavoro per sostenere le nostre dispendiose caratteristiche.



Ancora niente giraffa.

Quattro di noi camminavano da mezza giornata, sulle tracce di una giraffa ferita a cui Mwasad, un Hadza di trent'anni inoltrati, aveva sparato la sera prima. L'aveva colpita alla base del collo da una ventina di metri di distanza, con una freccia di legno dalla punta d'acciaio, spalmata di un potente veleno fatto in casa. Gli Hadza sono tradizionali cacciatori-raccoglitori, e vivono di piante e animali selvatici nelle aride savane incolte della Tanzania settentrionale; conoscono il territorio e i suoi abitanti meglio di quanto voi conosciate il supermercato sotto casa. Mwasad aveva lasciato andare la giraffa per dare al veleno il tempo di agire, sperando di trovarla morta al mattino. Un animale di quella taglia poteva bastare alla sua famiglia e a tutto l'accampamento per una settimana, ma solo se fosse riuscito a trovarla.

Condotta da Mwasad, la nostra comitiva – David Raichlen dell'Università dell'Arizona, un Hadza dodicenne di nome Neje e io – aveva lasciato il campo all'alba. Dave e io, in realtà, servivamo a poco; Mwasad ci aveva invitato in segno di amicizia, e anche, in caso di successo, per dare una mano a riportare al campo la carcassa una volta macellata. Da bravi antropologi e studiosi di ecologia ed evoluzione della specie umana, avevamo colto al volo l'opportunità di accompagnarlo: la capacità di seguire le tracce degli Hadza è leggendaria. Meglio che passare un'altra lunga giornata all'accampamento, a perdere tempo con gli strumenti.

Avevamo camminato un'ora in un mare ondulado d'erba dorata alta fino alla vita, senza sentiero e punteggiato di cespugli e alberi d'acacia spinosa, dritti al punto, ancora insanguinato, in cui la giraffa era stata colpita. Questa prova di orientamento era notevole: come una persona che vi porta in un campo di grano di 500 ettari al punto in cui aveva lasciato cadere uno stuzzicadenti e si china a raccogliarlo come se nulla fosse. Ore e ore sulle tracce dell'animale ferito, sotto il sole, seguendo segni sempre più tenui.

Ancora niente giraffa. Ma almeno avevo l'acqua. Riposavamo all'ombra di qualche arbusto, subito dopo mezzogiorno, mentre Mwasad rifletteva su dove potesse essersi diretto l'animale ferito. Me ne restava forse un litro; sufficiente, pensavo, per affrontare la calura del pomeriggio. Ma Mwasad, come fanno gli Hadza, non aveva portato acqua con sé. Nel rifare lo zaino prima di ripartire, gliene avevo offerto un po'. Lui mi aveva sorriso e se la era scolata tutta d'un fiato. Poi mi aveva teso la bottiglia vuota.

Me l'ero cercata. Dave, io, e Brian Wood, antropologo della Yale University, vivevamo da un mese con gli Hadza, per realizzare le prime misurazioni dirette della spesa energetica giornaliera in una popolazione di cacciatori-raccoglitori. Ne avevamo arruolato una ventina, uomini e donne, fra i quali appunto Mwasad, e dato loro da bere bottiglie di un'acqua costosa arricchita di due isotopi rari, deuterio e ossigeno-18. Analizzando la concentrazione degli isotopi nell'urina dei partecipanti avremmo calcolato il tasso di produzione di anidride carbonica dei loro corpi, dunque la loro spesa energetica giornaliera. Questo approccio dell'acqua doppiamente marcata è ormai di riferimento nella salute pubbli-

ca per misurare le calorie bruciate ogni giorno. È un metodo diretto, sicuro, e preciso; ma richiede che i partecipanti bevano l'acqua marcata fino all'ultima goccia. Avevamo fatto ogni sforzo per far capire che dovevano bere tutta l'acqua senza perderne una goccia. Mwasad ci aveva preso fin troppo sul serio.

A parte lo scherzetto di Mwasad, dagli Hadza abbiamo imparato parecchio su come il corpo umano brucia le calorie. Insieme a quelle di altri scienziati su altre popolazioni, la nostra ricerca ha svelato aspetti sorprendenti del metabolismo umano. I dati indicano che, contrariamente all'opinione comune, gli esseri umani tendono a bruciare sempre lo stesso numero di calorie, a prescindere dall'intensità della loro attività fisica. Eppure la nostra evoluzione ci ha portato a consumare parecchie calorie in più rispetto ai primati nostri cugini. Questi risultati contribuiscono a spiegare due enigmi che possono sembrare separati ma invece sono legati fra loro: perché l'esercizio fisico di solito non aiuta a perdere peso e come sono emersi alcuni dei tratti unici dell'umanità.

L'economia delle calorie

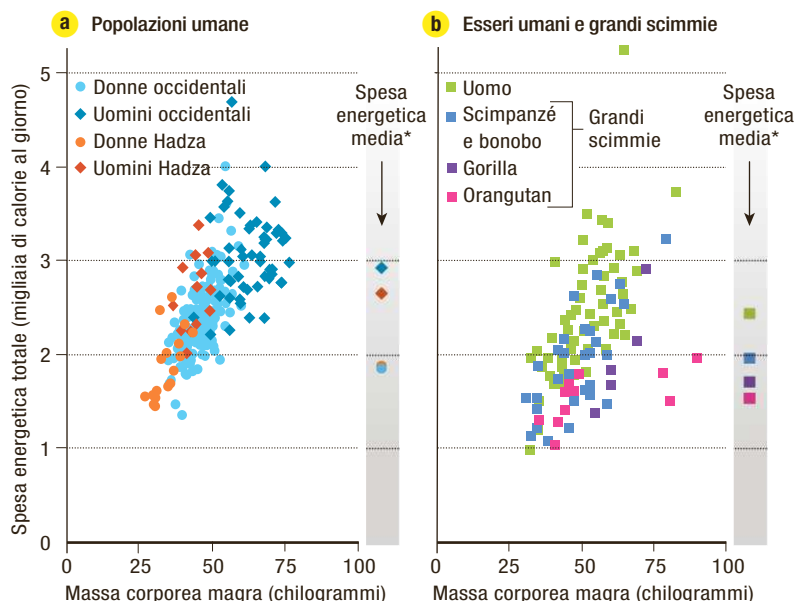
I ricercatori che studiano evoluzione ed ecologia umana si concentrano spesso sulla spesa energetica perché l'energia è centrale in qualunque cosa della biologia. Si possono capire molte cose di una specie misurandone il metabolismo: la vita è un gioco in cui convertire energia in cuccioli, e ogni tratto è affinato dalla selezione naturale per massimizzare la resa evolutiva delle calorie consumate. L'ideale è studiare una popolazione che vive nello stesso ambiente in cui si è evoluta la specie, dove continuano a operare le stesse pressioni evolutive che ne hanno plasmato la biologia; ma per gli esseri umani è difficile, perché la maggior parte delle persone sono ormai lontane dal quotidiano lavoro di procurarsi il cibo in un paesaggio naturale intatto. Per quasi tutti gli ultimi 2 milioni di anni, l'essere umano e i suoi antenati hanno vissuto e si sono evoluti come cacciatori-raccoglitori. L'agricoltura è arrivata solo 10.000 anni fa; città, industrie e tecnologia moderna da qualche generazione. Popolazioni come gli Hadza, una delle ultime di cacciatori-raccoglitori rimaste, sono essenziali per capire come funzionavano e si sono evoluti i nostri corpi prima che ci fossero vacche, automobili e computer.

La vita degli Hadza è fisicamente pesante. Ogni mattina le donne lasciano a piccoli gruppi le capanne di paglia dell'accampamento, alcune con un bambino in un fagotto sulla schiena, in cerca di bacche e altre piante commestibili. I tuberi selvatici sono un elemento base della dieta degli Hadza, e le donne possono passare ore a estrarli dal terreno sassoso con un bastone. Gli uomini vanno a caccia, percorrendo ogni giorno parecchi chilometri, con archi e frecce. Quando la selvaggina è scarsa, raccolgono miele scavando nei rami degli alberi con asce, spesso arrampicandosi anche a 13 metri di altezza e più. Anche i bambini contribuiscono, trasportando secchi d'acqua dal pozzo più vicino, spesso a due chilometri o più di distanza dal campo. Nel tardo pomeriggio, la

Consumi calorici a confronto

Gli esperti davano per scontato che le persone fisicamente attive bruciassero più calorie di quelle meno attive. Ma le misurazioni dirette della spesa energetica di cacciatori-raccoglitori in paesi in via di sviluppo e di popolazioni in confronto sedentarie di Stati Uniti ed Europa danno risultati simili (a). Se il metabolismo umano è così strettamente vincolato, come si sono evoluti il grande cervello, la lunga durata della vita e gli altri tratti energeticamente costosi che ci distinguono dai primati nostri parenti? Gli esseri umani consumano e bruciano ogni giorno centinaia di calorie in più delle grandi scimmie antropomorfe (b), il che fa pensare che il nostro motore metabolico si sia modificato per consumare l'energia più rapidamente, in modo da alimentare i nostri tratti più dispendiosi.

** Per tenere conto delle differenze di spesa energetica dovute alle diverse corporature, le medie degli occidentali sono ricondotte alla corporatura degli Hadza, e quelle delle grandi scimmie antropomorfe alla corporatura media umana.*



gente ritorna all'accampamento, e va a sedersi per terra accanto ai piccoli focolari dove cuoce il cibo; si chiacchiera, si condivide il raccolto della giornata e si bada ai bambini. I giorni passano così, nella stagione secca e in quella umida, da millenni.

Ma scordatevi ogni romantica nozione di paradiso perduto. Caccia e raccolta sono giochi cerebrali e rischiosi, in cui la posta è in calorie ed è elevata; perdere la partita significa morte. Gli uomini, come Mwasad, consumano centinaia di calorie al giorno sulle piste della selvaggina: una scommessa che, sperano, li ripagherà con una preda. Saperci fare è essenziale quanto la resistenza fisica. Altri predatori possono contare su velocità e forza per ottenere una preda, gli esseri umani devono pensare più velocemente dei loro bottini, ragionando sulle loro tendenze comportamentali e battendo il territorio in cerca di segni di selvaggina. Anche così, gli uomini Hadza prendono un animale di grossa taglia, come una giraffa, in media solo una volta al mese. E farebbero la fame se le donne Hadza non applicassero una strategia complementare altrettanto raffinata, usando la propria enciclopedia conoscenza della vegetazione locale per portare a casa un'affidabile raccolto quotidiano. Questa complessa modalità cooperativa di raccolta delle risorse ha dato agli esseri umani il loro incredibile successo evolutivo, ed è al centro stesso di quello che ci rende unici.

I ricercatori che si occupano di salute pubblica o evoluzione umana hanno a lungo ipotizzato che i nostri antenati cacciatori-raccoglitori bruciassero più calorie di chi abita oggi in città. Visto quanto è duro il quotidiano lavoro fisico degli Hadza, sembra impossibile pensarla diversamente. Molti esperti di salute sostengono anzi che questa riduzione della spesa energetica quotidiana sia dietro alla pandemia globale di obesità nel mondo sviluppato, con le calorie che invece di essere bruciate si accumulano come grasso. Una delle ragioni per cui volevamo misurare il metabolismo degli Hadza era determinare questo divario energetico e quanto fossimo deficitari, noi occidentali, nella nostra spesa energetica quotidiana. Tornato negli Stati Uniti ho confezionato i flaconi di

urina degli Hadza in ghiaccio secco per inviarli al Baylor College of Medicine, dove si trova uno dei migliori laboratori statunitensi per il metodo dell'acqua doppiamente marcata, immaginando già le montagne di calorie che avrebbero rivelato.

Ma sulla strada per lo spettrometro di massa per i rapporti isotopici è successo qualcosa di bizzarro. Quando ci sono arrivate le analisi, gli Hadza parevano uguali a tutti gli altri. Gli uomini mangiavano e bruciavano circa 2600 calorie al giorno, le donne circa 1900: le stesse degli adulti in Europa e Stati Uniti. Abbiamo rigirato i dati in tutti i modi, considerando gli effetti di dimensioni corporee, percentuale di grasso, età e sesso. Nessuna differenza. Com'era possibile? Che cosa ci sfuggiva? E quante altre cose sbagliavamo in fatto di biologia ed evoluzione degli esseri umani?

Le balle del mio braccialetto fitness

Sembra così ovvio che le persone fisicamente attive brucino più calorie che accettiamo questo paradigma senza riflessioni critiche e prove sperimentali. Ma dagli anni ottanta e novanta, con l'avvento del metodo dell'acqua doppiamente marcata, i dati empirici hanno più volte messo in discussione i luoghi comuni degli esperti di salute e nutrizione. I risultati degli Hadza, per quanto strani, non erano un fulmine a ciel sereno, ma la prima goccia gelida di un acquazzone che si preparava inosservato da anni.

I primi studi con acqua doppiamente marcata effettuati fra gli agricoltori tradizionali di Guatemala, Gambia e Bolivia hanno mostrato che la loro spesa energetica era grosso modo simile a quella della popolazione urbanizzata. In uno studio pubblicato nel 2008 Amy Luke, ricercatrice della Loyola University di Chicago, ha fatto un passo in più, confrontando spesa energetica e attività fisica di donne di aree rurali in Nigeria con quelle di donne afroamericane di Chicago. Come nel caso degli Hadza, il suo studio non ha trovato differenze nella spesa energetica quotidiana tra le due popolazioni, malgrado forti differenze nei livelli di attività. Proseguendo questo lavoro Lara Dugas, sempre alla Loyola, ha ana-

lizzato con Luke i dati di 98 popolazioni di ogni parte del mondo e mostrato che le popolazioni viziate dalle moderne comodità del mondo sviluppato hanno spese energetiche simili a quelle dei paesi meno sviluppati, la cui vita è fisicamente più dura.

Gli esseri umani non sono l'unica specie con un tasso fisso di spesa energetica. In seguito allo studio sugli Hadza, ho guidato una collaborazione per misurare la spesa energetica quotidiana fra i primati, il gruppo di mammiferi che include noi, scimmie, scimmie antropomorfe e lemuri. Abbiamo trovato che i primati in cattività in laboratori e zoo bruciano lo stesso numero di calorie di quelli selvatici, malgrado le differenze di attività fisica. Nel 2013 ricercatori australiani hanno trovato spese energetiche simili in pecore e canguri rinchiusi o lasciati liberi di vagabondare. Nel 2015 un gruppo cinese ha riferito che la spesa energetica per panda giganti degli zoo e panda selvatici era la stessa.

Per guardare più in dettaglio, passando dalle medie delle popolazioni ai singoli individui, mi sono unito a Luke e al suo gruppo, di cui fa parte anche Dugas, per esaminare attività e spesa energetica in una vasta analisi pluriennale chiamata METS. Gli oltre 300 partecipanti hanno indossato accelerometri, dispositivi di tracciamento dell'attività fisica simili ai braccialetti FitBit, 24 ore su 24 per una settimana, mentre la loro spesa energetica era misurata con acqua doppiamente marcata. Abbiamo trovato che l'attività quotidiana rilevata dagli accelerometri era solo debolmente collegata al metabolismo. In media, chi passava la vita in poltrona spendeva 200 calorie al giorno in meno delle persone moderatamente attive, quelle che fanno un po' di esercizio fisico ogni settimana e prendono le scale invece dell'ascensore. Ma, soprattutto, oltre un certo punto la spesa energetica smette di crescere: le persone quotidianamente più attive bruciavano ogni giorno lo stesso numero di calorie di chi conduceva una vita moderatamente attiva. Nello studio, insomma, si vede al livello dei singoli individui lo stesso fenomeno per cui la spesa energetica degli Hadza è in linea con quella delle altre popolazioni.

Come fa il corpo ad adattarsi a un più alto livello di attività per tenere sotto controllo la spesa energetica quotidiana? Come fanno gli Hadza a spendere centinaia di calorie al giorno e bruciare però lo stesso numero totale di calorie di persone sedentarie a confronto in Stati Uniti ed Europa? Non lo sappiamo ancora per certo; il costo delle attività in sé, comunque, è sempre lo stesso: sappiamo, per esempio, che per fare un chilometro un Hadza adulto brucia altrettante calorie di un adulto occidentale. Può darsi che chi ha un alto livello di attività modifichi il suo comportamento in modo sottile per risparmiare energia, per esempio sedendosi invece di stare in piedi o dormendo più profondamente. La nostra analisi dello studio METS suggerisce che questi cambiamenti comportamentali possono contribuire, ma non bastano a dare conto della costanza della spesa energetica quotidiana.

Un'altra possibilità affascinante è che il corpo dia spazio al costo dell'attività addizionale riducendo le calorie spese in molti compiti non visibili che assorbono la maggior parte del bilancio energetico quotidiano: il lavoro di manutenzione che svolgono cellule e organi per mantenerci vivi. Risparmiare energia in questi processi potrebbe liberare spazio, nel bilancio energetico quotidiano, permettendoci di spendere di più per l'attività fisica senza aumentare il totale di calorie giornaliere. Per esempio, spesso l'esercizio riduce l'attività infiammatoria del sistema immunitario contro le infezioni, e anche i livelli di ormoni riproduttivi come

gli estrogeni. In animali di laboratorio, aumentare l'esercizio fisico quotidiano non ha effetti sulla spesa energetica giornaliera ma riduce il numero di cicli di ovulazione e rallenta la riparazione dei tessuti. In casi estremi, alcuni animali possono mangiare i propri piccoli non ancora svezzati. Negli esseri umani e in altri animali, l'evoluzione sembra aver generato strategie per mantenere la spesa energetica quotidiana entro precisi limiti.

Queste prove indicano che l'obesità potrebbe essere una malattia della gola più che dell'accidia. Le persone ingrassano quando le calorie che mangiano superano quelle che consumano. Se la spesa energetica quotidiana non è mutata nel corso della storia umana, la colpa della moderna pandemia di obesità deve essere innanzitutto delle calorie ingerite. Non dovrebbe essere una novità. Non si può sfuggire a una cattiva dieta, e gli esperti sanno, per esperienza e dati, che se si vuol perdere peso andare solo in palestra porta frustrazioni. Ma le nuove ricerche contribuiscono a spiegare come mai per perdere peso l'esercizio fisico serva poco. Non è questione di impegno. È che il corpo rema contro.

L'esercizio fisico comunque ci vuole. Questo articolo non è un esonero dall'ora di ginnastica. Fare esercizio dà tanti benefici documentati: da un aumento della salute di cuore e sistema immunitario al miglioramento della funzione cerebrale

all'invecchiamento in salute. Anzi, ho il sospetto che l'adattamento metabolico all'attività sia uno dei motivi per cui l'esercizio ci mantiene in salute, sottraendo energie a processi, come quelli infiammatori, che protratti nel tempo hanno conseguenze negative. Infiammazioni croniche, per esempio, sono state collegate a malattie cardiovascolari e disturbi autoimmuni.

Il cibo che mangiamo influisce sulla nostra salute, e l'esercizio fisico unito a cambiamenti della dieta può aiutare a non riprendere i chili di troppo una volta raggiunto un giusto peso, ma le prove indicano che la cosa migliore è considerare dieta ed esercizio fisico strumenti diversi per cose diverse. Esercizio per mantenersi sani e vitali; concentrarsi sulla dieta per il peso.

Bilancio energetico ed evoluzione

Anche se i recenti studi sull'adattamento metabolico chiariscono il rapporto tra esercizio fisico e obesità, il fatto che il metabolismo sia vincolato e adattativo lascia domande più profonde. Se la spesa energetica giornaliera è fissa, come hanno fatto gli esseri umani a evolversi fino a diversificarsi dalle grandi scimmie con cui siamo imparentati? Nella vita, nulla è gratuito. Le risorse sono limitate, e investire di più in un certo tratto significa investire meno in un altro. Non a caso i conigli si riproducono prodigiosamente ma muoiono giovani; mettere tanta energia nella prole significa averne meno per manutenzione corporea e longevità. *Tyrannosaurus rex* può ringraziare la sua grande testa dalle terribili zanne e le poderose zampe posteriori per le sue braccia gracili e le mani piccole. Anche i dinosauri non potevano avere tutto.

Gli esseri umani sfidano questo basilare principio evolutivo di austerità. Il nostro cervello è così grande che mentre siete seduti a leggere l'articolo l'ossigeno di un respiro su quattro è necessario solo per alimentare il cervello. Eppure gli esseri umani hanno neonati più grandi, si riproducono più spesso, vivono più a lungo e sono fisicamente più attivi di tutte le grandi scimmie nostre parenti. Gli accampamenti degli Hadza sono pieni di bambini allegri e chiassosi e di uomini e donne solidi e attivi sui sessanta e i settant'anni. La nostra generosa spesa energetica è un enigma

**Tutti i dati
indicano
che l'obesità
sarebbe dovuta
alla gola, più
che all'accidia**

Gli Hadza della Tanzania, cacciatori-raccoglitori, spendono centinaia di calorie al giorno per attività fisiche, eppure bruciano le stesso numero di calorie dei cittadini degli Stati Uniti.



evoluzionistico. Gli esseri umani sono così simili alle altre grandi scimmie, geneticamente e biologicamente, che i ricercatori hanno dato a lungo per scontato che lo fossero anche nel metabolismo. Ma se la spesa energetica è tanto vincolata quanto suggerisce anche il nostro studio sugli Hadza, come ha fatto un rigido metabolismo scimmiesco ad arrivare a gestire tutte le calorie richieste dai nostri dispendiosi tratti umani?

Sulla scia del nostro studio comparativo sulla spesa energetica dei primati, ci siamo chiesti se l'insieme adattativo di tratti energeticamente dispendiosi degli esseri umani non sia stato alimentato da un mutamento della fisiologia del metabolismo energetico. Nello studio abbiamo trovato che i primati bruciano quotidianamente solo la metà delle calorie di altri mammiferi. Il ridotto tasso metabolico dei primati corrisponde ai loro ridotti tassi di crescita e di riproduzione. Forse la riproduzione più rapida e altri tratti dispendiosi degli esseri umani sono stati legati all'evoluzione di un accresciuto tasso metabolico. Per verificare l'idea bastava convincere frenetici scimpanzé, maliziosi bonobo, flemmatici orangutan e ombrosi gorilla a bere una dose di acqua doppiamente marcata, e poi a fornire campioni d'urina. Una cosetta da nulla. I miei colleghi Steve Ross e Mary Brown, entrambi al Lincoln Park Zoo di Chicago, hanno fatto squadra con veterinari e custodi di oltre una dozzina di zoo negli Stati Uniti. In un paio d'anni hanno accumulato abbastanza dati sulla spesa energetica delle grandi scimmie da permettere un solido confronto con gli esseri umani.

Di certo, gli esseri umani bruciano giornalmente più calorie di ogni altra grande scimmia. Anche considerando dimensioni del corpo, livelli di attività e altri fattori, consumiamo 400 calorie al giorno in più di scimpanzé e bonobo; e le differenze con gorilla e orangutan sono ancora maggiori. Queste calorie in più sono il lavoro extra che i nostri corpi svolgono per sostenere cervelli più grandi, avere più bambini e mantenersi in buone condizioni per vivere più a lungo. Non è solo che mangiamo più delle altre scimmie; come sappiamo, intasare di calorie un corpo non equipaggiato per usarle porta solo all'obesità. I nostri corpi, fino al livello cellulare, si sono evoluti per bruciare l'energia più in fretta e fare più cose delle altre scimmie antropomorfe. L'evoluzione umana non è avvenuta senza compromessi. Il nostro tratto digestivo, per esem-

pio, è ridotto e meno costoso di quello delle grandi scimmie, che hanno bisogno di un intestino lungo e di alto costo energetico per una dieta di vegetali pieni di fibre. Ma i cambiamenti decisivi grazie a cui siamo diventati quello che siamo sono stati alimentati dal cambiamento evolutivo del nostro motore metabolico.

Condividere la buona e la cattiva sorte

A un certo punto del tardo pomeriggio il nostro cammino aveva piegato verso l'accampamento; Mwasad guardava in avanti invece di scrutare il terreno. Tornavamo a casa, e senza giraffa. Qui c'è il limite di fondo della strategia umana ad alto consumo energetico: tornare a casa a mani vuote diventa più probabile e più grave. Molti cibi ricchi di energia di cui abbiamo bisogno per alimentare il nostro metabolismo più veloce sono difficili da ottenere in natura, facendo salire il costo della ricerca del cibo e aumentando il rischio di restare a digiuno per uomini e donne impegnati nella ricerca e i piccoli che restano al campo.

Fortunatamente per Mwasad, l'evoluzione ha dato alla specie umana qualche trucco per tenere alla larga la fame. Siamo l'unica specie che ha imparato a cuocere il cibo, il che incrementa il valore calorico di molti alimenti e li rende più facili da digerire. La nostra padronanza del fuoco fa di radici vegetali altrimenti immangiabili, dalle patate del supermercato ai tuberi degli Hadza, vere e proprie bombe d'amido. Siamo anche evoluti per essere grassi. Lo sappiamo bene, vista la crisi di obesità dell'Occidente, ma anche gli Hadza adulti, magri secondo qualunque metro di misura umano, hanno il doppio del grasso degli scimpanzé impigrati degli zoo. Può essersi fatta problematica nei tempi moderni, ma molto probabilmente la nostra propensione a immagazzinare grasso si è evoluta insieme al nostro metabolismo più rapido, come essenziale «cuscinetto» energetico per resistere ai tempi di magra.

Il Sole pesante e arancione toccava le cime degli alberi quando siamo tornati nell'accampamento, Dave e io verso le nostre tende, Mwasad e Neje nelle loro capanne, tutti contenti di essere a casa. La giraffa era persa, ma nessuno ha patito la fame quella sera. Nella massima normalità e senza sforzo cosciente, l'accampamento è ricorso all'arma più ingegnosa e potente della nostra specie contro la fame: la condivisione. Condividere il cibo è un'esperienza umana fondamentale, un filo che passa per ogni festa, compleanno, solennità religiosa, tanto che la diamo per scontata; ma in realtà è un aspetto speciale ed essenziale del nostro retaggio evolutivo. Le altre grandi scimmie non condividono.

Al di là di requisiti nutrizionali e fissazioni sul grasso, forse l'impatto più profondo della nostra accresciuta spesa energetica è proprio questo umano imperativo a collaborare. L'evoluzione di un metabolismo più veloce ha legato le fortune di ognuno a quelle degli altri, imponendoci di cooperare o morire. Mentre sedevo con Dave e Brian, e raccontavo le avventure della giornata davanti a sardine in scatola e patatine, mi sono reso conto che non avrei voluto niente di diverso. Niente giraffa? Non c'è problema. ■

PER APPROFONDIRE

Hunter-Gatherer Energetics and Human Obesity. Pontzer H. e altri, in «PLoS One», Vol. 7, n. 7, articolo n. e40503, 25 luglio 2012.

Constrained Total Energy Expenditure and Metabolic Adaptation to Physical Activity in Adult Humans. Pontzer H. e altri, in «Current Biology», Vol. 26, n. 3, pp. 410-417, 8 febbraio 2016.

Metabolic Acceleration and the Evolution of Human Brain Size and Life History. Pontzer H. e altri, in «Nature», Vol. 533, pp. 390-392, 19 maggio 2016.

Cibo per pensare. Leonard W.R., in «Le Scienze» n. 413, gennaio 2003.



LINGUISTICA

La parola fischciata

Prima dello smartphone
e perfino del codice Morse,
alcune popolazioni rurali
«parlavano» a distanza
fischciando, un mezzo di
comunicazione che ancora
oggi affascina i linguisti

Comunicazione wireless.

Nel villaggio di Antia, in Grecia,
Kiriakoula Yiannakari dimostra come
fischciare un messaggio ai vicini.

di Julien Meyer

Julien Meyer lavora come linguista e bioacustico presso il Centre national de la recherche scientifique e il laboratorio GIPSA a Grenoble, in Francia. Le sue ricerche riguardano fonetica, cognizione linguistica e comunità linguistiche e rurali. Gestisce il progetto Icon-Eco-Speech ed è tra i fondatori della World Whistles Research Association, che documenta e tutela le lingue fischiate.



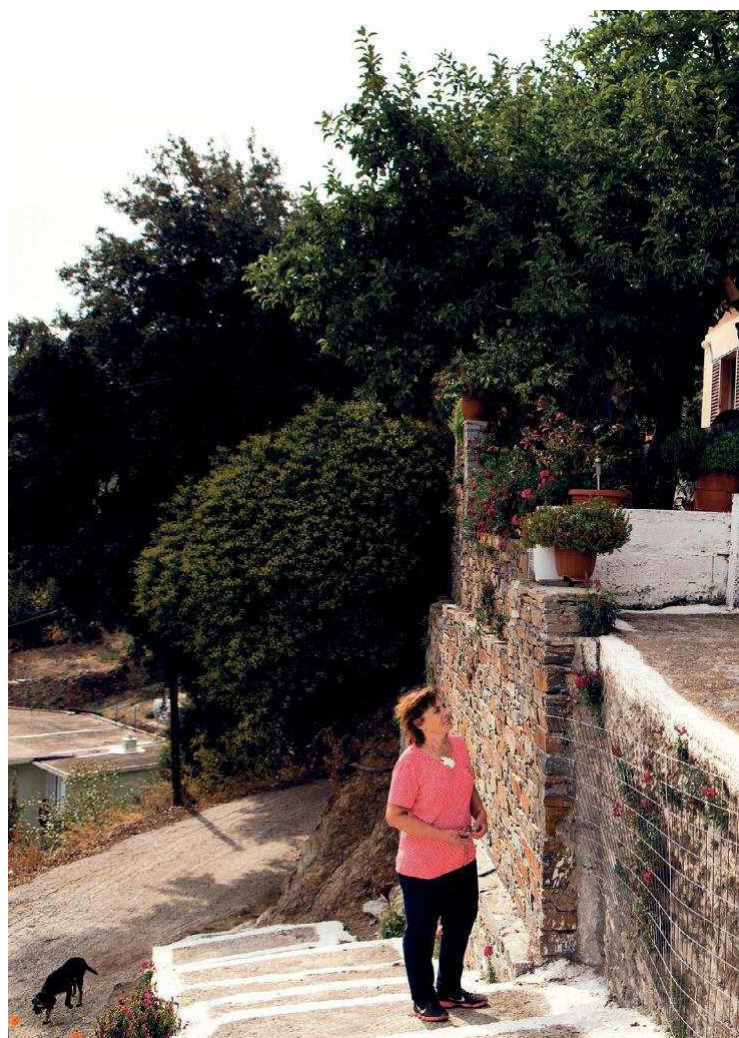
In una mattina di primavera Panagiotis Kefalas

si trovava nella sua taverna ad Antia, un villaggio greco, quando ha ricevuto una chiamata dalla sua amica Kyria Koula. Kefalas prevedeva di fare colazione a casa di lei, distante circa 200 metri dalla taverna. La chiamata non ha avuto inizio con lo squillo di un cellulare, ma è arrivata direttamente dalla bocca di Koula alle orecchie di Kefalas, come una serie di fischi ad alta frequenza.

«Benvenuto, che cosa vuoi?», ha cinguettato Koula. Kefalas ha socchiuso le labbra e fischiando ha risposto: «Vorrei mangiare».
«Bene», ha risposto Koula.
«Vorrei uova strapazzate», ha aggiunto spontaneamente Kefalas.

Un estraneo in visita ad Antia sarebbe rimasto perplesso. L'inizio della prima battuta, «benvenuto» (*kalós irthate* in greco translitterato), suonava come il classico fischio di apprezzamento – «fii-fiiuu» – a parte un netto aumento dell'altezza nella seconda sillaba prolungata.

Secondo alcune testimonianze, la tradizione ormai morente della lingua fischiata, mantenuta da qualche decina di abitanti



ad Antia, per secoli è stata il miglior modo di comunicare da una collina all'altra per i pastori. D'altronde i fischi arrivano molto più lontano delle grida e non affaticano le corde vocali. Perfino oggi in questo villaggio all'estremità meridionale di Eubea, la seconda isola della Grecia per grandezza, a volte i pensionati usano questa forma di comunicazione *wireless* pretecnologica ed efficiente, da casa a casa, per trasmettere notizie, pettegolezzi o inviti a colazione.

Ho registrato la conversazione tra Panagiotis Kefalas e Kyria Koula nel maggio 2004. Fin dai primi anni duemila ho studiato le lingue fischiate in montagne sperdute e giungle fitte, in tutto il mondo. In quel periodo io e i miei colleghi di svariate istituzioni ci siamo imbattuti in molte lingue fischiate ancora sconosciute. Inoltre abbiamo misurato le incredibili distanze che possono esse-

IN BREVE

Prima che le comunicazioni elettroniche diventassero onnipresenti nella nostra vita, gli abitanti di villaggi rurali crearono versioni fischiate della propria lingua madre, per parlare da una collina all'altra o anche solo da casa a casa.

Erodoto citava le lingue fischiate nel IV libro delle sue *Storie*, ma fino a poco tempo fa i linguisti non avevano effettuato molte ricerche su suoni e significati di questa forma di comunicazione, oggi a rischio di estinzione.

Nuove indagini hanno scoperto linguaggi fischiati a livello globale. In tutto il mondo le popolazioni che comunicano in questo modo sono circa 70, molte di più della dozzina di gruppi identificati in precedenza. **I linguisti** hanno promosso

l'interesse per queste lingue, e oggi alle isole Canarie le scuole ne insegnano la varietà locale. Una lingua fischiata è sia un patrimonio culturale sia un sistema per studiare come il cervello elabora le informazioni.



1

La competenza tecnica dimostrata da Georgia Yiannakari, residente ad Antia, riceve l'approvazione di Maria Kefala (1, in rosa), traduttrice esperta di greco fischiato. Yiannis Tsipas (2, al centro) spera di tramandare la capacità di fischiare che ha acquisito dai genitori – sua madre Aristi è accanto a lui – a suo figlio Vassilis.



2

re percorse dalle parole fischiate, e siamo arrivati a comprendere come soffiando aria attraverso le labbra si possano esprimere intere frasi, e anche come il cervello dei destinatari riesca a decodificare le parole.

Un inizio lento

Ho cominciato a interessarmi a queste lingue quasi vent'anni fa, dopo avere letto un articolo di «Scientific American» del 1957 su una versione detta *silbo gomero*, parlata ancora oggi in Spagna a La Gomera, una delle isole Canarie. Decisi che volevo saperne di più, così questo diventò l'argomento della mia tesi di dottorato, a partire dal 2003.

Quando era stato pubblicato questo articolo, pochissimi ricercatori erano interessati a studiare le lingue fischiate, sebbene fossero note fin dall'antichità: in *Melpomene*, il IV libro delle sue *Storie*, Erodoto accennava a trogloditi etiopi che «parlavano come pipistrelli». Nel 2003 questo interesse era ormai cresciuto, ma pochi linguisti avevano condotto ricerche sui suoni e i significati trasmessi dalle lingue fischiate, e molti studi avevano esaminato solo il *silbo gomero*.

Il termine «lingua fischiata» non è del tutto appropriato. In effetti non è qualcosa di separato rispetto a una lingua o un dialetto nativo, ne rappresenta un'estensione. Invece di usare la voce per pronunciare in greco *Boró na ého omeléta?* (Posso avere uova

strapazzate?), si articolano le stesse parole sotto forma di fischi. I loro suoni non fanno altro che subire un forte spostamento: non sono generati da vibrazioni delle corde vocali, ma da un flusso compresso di aria dalla bocca, che gira in vortici turbolenti alle estremità delle labbra. Proprio come nel parlare consueto, lingua e mascella di chi fischia si muovono per formare parole diverse, ma la gamma di movimenti è più limitata. A cambiare è l'altezza del fischio; quando si parla, invece, può variare anche il timbro (che distingue un suono dall'altro, a parte altezza e volume).

In fondo le parole fischiate trasmesse nel villaggio di Antia sono pur sempre greco. A volte i linguisti paragonano un fischio a un sussurro, nel senso che entrambi sono modi alternativi di parlare la stessa lingua senza usare la vibrazione delle corde vocali. Il linguista André Classe, autore dell'articolo su «Scientific American» che mi ha ispirato, ha definito il linguaggio fischiato uno «scheletro informativo» naturale descrivendone la natura ridotta all'osso. Ha osservato che, in termini di intelligibilità, le lingue fischiate non sono sempre pari a quelle parlate, ma vi si avvicinano.

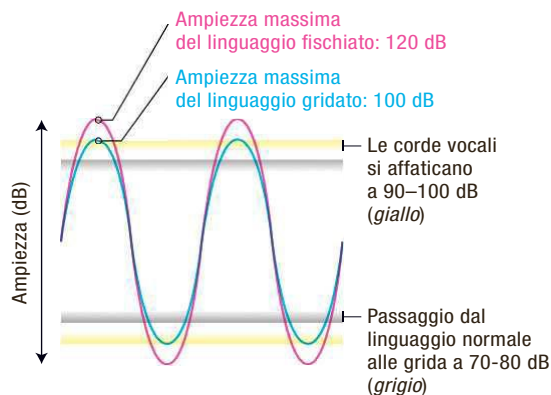
Nelle mie prime ricerche ho scoperto documenti interessanti scritti da viaggiatori, funzionari coloniali, missionari e antropologi che descrivevano una dozzina di lingue fischiate. Questi indizi mi hanno portato a sospettare che in tutto il mondo esistessero altre versioni fischiate delle lingue parlate.

Quindi, nei primi anni duemila ho cominciato a collaborare con

La fisica dei fischi

Il linguaggio fischciato è una forma alternativa di una lingua nativa – per esempio greco, turco o spagnolo – che trasmette le parole usando un flusso compresso di aria, che gira in piccoli vortici alle estremità delle labbra. A una lingua fischciata mancano le componenti armoniche della voce. Eppure l'unica banda di frequenze, stretta e modulata, con cui si rappresentano vocali e consonanti in una lingua non tonale, come il greco, riesce comunque a soddisfare i requisiti essenziali di una lingua. Permette così di esplorare in modo innovativo le capacità cognitive del cervello umano.

Le onde sonore generate dai fischi ricadono nell'intervallo di frequenza che, secondo quanto scoperto da ingegneri e psicologi, è ottimale per essere rilevato dall'orecchio. Un fischio è una banda a frequenza singola in quest'area dello spettro, più facile da rilevare per l'orecchio umano rispetto alle onde complesse prodotte dal normale linguaggio parlato, che coprono un intervallo di frequenza molto più ampio.



Un fischio ha un'ampiezza (volume) massima di 120 decibel, a fronte di 100 decibel per il linguaggio gridato. Un grido a 100 decibel affatica velocemente le corde vocali.

Quando i suoni si propagano in condizioni ideali, perdono circa 6 decibel ogni volta che raddoppia la distanza dalla fonte. Inoltre un segnale acustico rimbalza contro gli ostacoli, come il terreno e i tronchi degli alberi. Il linguaggio parlato consiste in un ampio insieme di frequenze, e una determinata banda in quell'intervallo si diffonde diversamente da un'altra quando viene a contatto con un oggetto fisico. Un fischio, invece, contiene tutte le informazioni linguistiche comunicate in una sola banda stretta. I suoni a bassa frequenza resistono alla diffusione da parte di barriere fisiche come la vegetazione fitta, e questa caratteristica acustica permette loro di propagarsi più lontano.

Onda sonora ad alta frequenza

Diffusione

Propagazione

Onda sonora a bassa frequenza

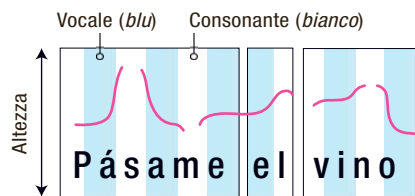
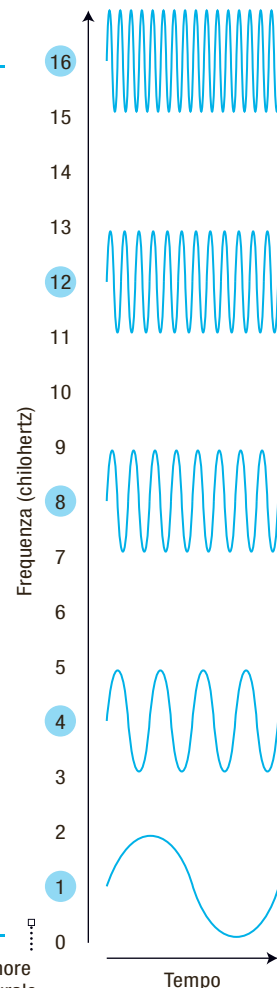
Ostacolo

Intervallo del linguaggio parlato

Intervallo ideale per la comprensibilità

Intervallo dei fischi

Intervallo del rumore di fondo naturale



Ogni tipo di linguaggio fischciato, per esempio il silbo spagnolo delle isole Canarie, ha un sistema per pronunciare vocali e consonanti che si avvicina a quello della lingua parlata, variando l'altezza del fischio o interrompendo il flusso d'aria. In questo modo, la maggioranza delle informazioni codificate in vocali e consonanti è trasmessa grazie a variazioni di frequenza e ampiezza. Inoltre il normale linguaggio parlato si basa sul timbro per identificare vocali e consonanti, che a lunga distanza svaniscono. Chi fischia, invece, è in grado di enunciare chiaramente frasi come «Passami il vino» facendosi sentire da lontano.

Le caratteristiche acustiche del fischio permettono al suono di arrivare fino a dieci volte più lontano rispetto alle parole gridate: questa distanza può raggiungere vari chilometri nelle valli e in altre zone con una buona trasmissione acustica.

Linguaggio gridato

500 metri

Linguaggio fischiato

5000 metri

la mia collega Laure Dentel: in 14 mesi di lavoro sul campo abbiamo visitato luoghi dove qualche prova faceva ritenere che questa pratica fosse ancora diffusa. In seguito mi sono unito a una rete di colleghi per condurre nuovi studi sul campo in tutto il mondo. Nell'ambito di questa attività ho documentato il linguaggio fischiato dei Wayâpi nella foresta amazzonica, in collaborazione con la linguista Elissandra Barros da Silva in Brasile e l'antropologo Damien Davy nella Guyana Francese. Insieme con Dentel ho studiato gli Akha e i Hmong nel Sudest Asiatico, e con il linguista Rachid Ridouane i berberi Tamazight sui monti dell'Atlante in Marocco. Inoltre, nel 2009 Dentel, il linguista Denny Moore e io abbiamo cominciato una collaborazione, durata cinque anni, presso la divisione di linguistica del Museu Paraense Emilio Goeldi a Belém, in Brasile. Qui abbiamo descritto la lingua fischiata della popolazione Gavião nello Stato amazzonico di Rondônia.

Le nostre ricerche hanno sfruttato gli ultimi strumenti di linguistica e acustica, oltre a metodi da molti campi, tra cui fonetica, psicolinguistica, bioacustica e sociolinguistica. Per esempio abbiamo adottato i metodi di registrazione che i bioacustici usano per studiare la comunicazione degli animali, perché sono adatti all'analisi della comunicazione fischiata su lunghe distanze.

La nostra ricerca ha scoperto le modalità con cui le parole si trasmettono con i fischi. È possibile arricciare le labbra, fischiare con le dita o soffiare in una foglia, oppure in un flauto. Alcuni parlanti combinano tecniche diverse in base alla distanza a cui vogliono mandare un messaggio. Le parole sono costruite a partire da questi suoni, a seconda del fatto che il linguaggio parlato da cui deriva quello fischiato usi le variazioni di tono per trasmettere significati diversi, come in mandarino e cantonese, o che invece i toni servano quasi solo a evidenziare una parola, come in greco e spagnolo. In una lingua tonale l'altezza crescente di un fischio corrisponde all'intonazione ascendente del tono parlato. Nelle lingue non tonali, invece, l'altezza costante di un fischio rappresenta una vocale: si potrebbe comunicare una «i» con un fischio alto e una «e» con uno più basso. In entrambi i tipi di lingua, chi fischia forma le consonanti modulando la velocità con cui si modifica il suono nel passaggio da un'altezza all'altra.

Il censimento

Finora la nostra indagine è riuscita a localizzare una settantina di popolazioni che usano il linguaggio fischiato, per lo più in zone di montagna isolate o con una vegetazione fitta. Questo numero è solo una minima parte delle 7000 lingue del mondo, ma è nettamente superiore al conteggio precedente. In tutti questi luoghi, come lasciavano intuire le ricerche precedenti, le lingue fischiate si usano soprattutto per trasmettere messaggi a distanze maggiori che con le grida, ma hanno anche altri impieghi. Possono dare un aiuto nei rituali di corteggiamento all'interno di un villaggio. Si possono usare per comunicare in un ambiente rumoroso o per trasmettere messaggi segreti alla presenza di estranei («Devi nasconderti perché sta arrivando la polizia».) E possono aiutare i cacciatori a catturare le prede: nella foresta amazzonica gli animali riconoscono la voce umana, ma non i fischi.

L'analisi acustica dei fischi usati per le comunicazioni su lunghe distanze dimostra che, in condizioni meteorologiche e topografiche favorevoli, un fischio può percorrere vari chilometri. La frequenza va da 0,9 a 4 kilohertz: corrisponde quasi esattamente

all'intervallo che, secondo gli ingegneri delle telecomunicazioni, è il migliore per distinguere con precisione i suoni costitutivi delle parole. In un esperimento che abbiamo effettuato in una valle vicina alle Alpi francesi, il linguaggio parlato si sentiva fino a 40 metri e le grida fino a 200, mentre i fischi erano comprensibili anche a 700 metri. Questa misura non costituisce un record, ma ha dimostrato il vantaggio relativo dei fischi in condizioni medie, tra cui un certo rumore di fondo e un vento leggero.

Lo studio del linguaggio fischiato ha aiutato i linguisti a dimostrare la capacità del cervello umano di riconoscere parole e frasi in un segnale acustico che trasmette meno informazioni rispetto a quello prodotto dalla voce umana. Alla singola frequenza di un determinato fischio mancano le componenti armoniche della voce; eppure anche quest'unica frequenza modulata soddisfa i requisiti essenziali di una lingua vera e propria, cioè comunicare chiaramente informazioni. Il linguaggio fischiato perciò è un sistema importante con cui esplorare le capacità cognitive del nostro cervello per comunicare in modo non tradizionale.

Decenni fa il bioacustico René-Guy Busnel, con il quale ho collaborato fin dall'inizio della mia tesi di dottorato, ha effettuato uno studio sulla percezione del linguaggio fischiato tra gli abitanti di Kus,köy, un paese sui monti della Turchia nord-orientale. Usando la forma fischiata di turco detta «la lingua degli uccelli», su distan-

L'analisi acustica dei fischi indica che, in condizioni molto favorevoli, il suono si trasmette lungo una distanza di diversi chilometri

ze brevi i paesani erano in grado di riconoscere singole parole circa nel 70 per cento dei casi, a fronte di un 95 per cento per il normale linguaggio parlato. Riuscivano perfino a riconoscere un'intera frase circa otto volte su dieci nella situazione in cui le persone erano abbastanza lontane da non potersi vedere bene faccia a faccia.

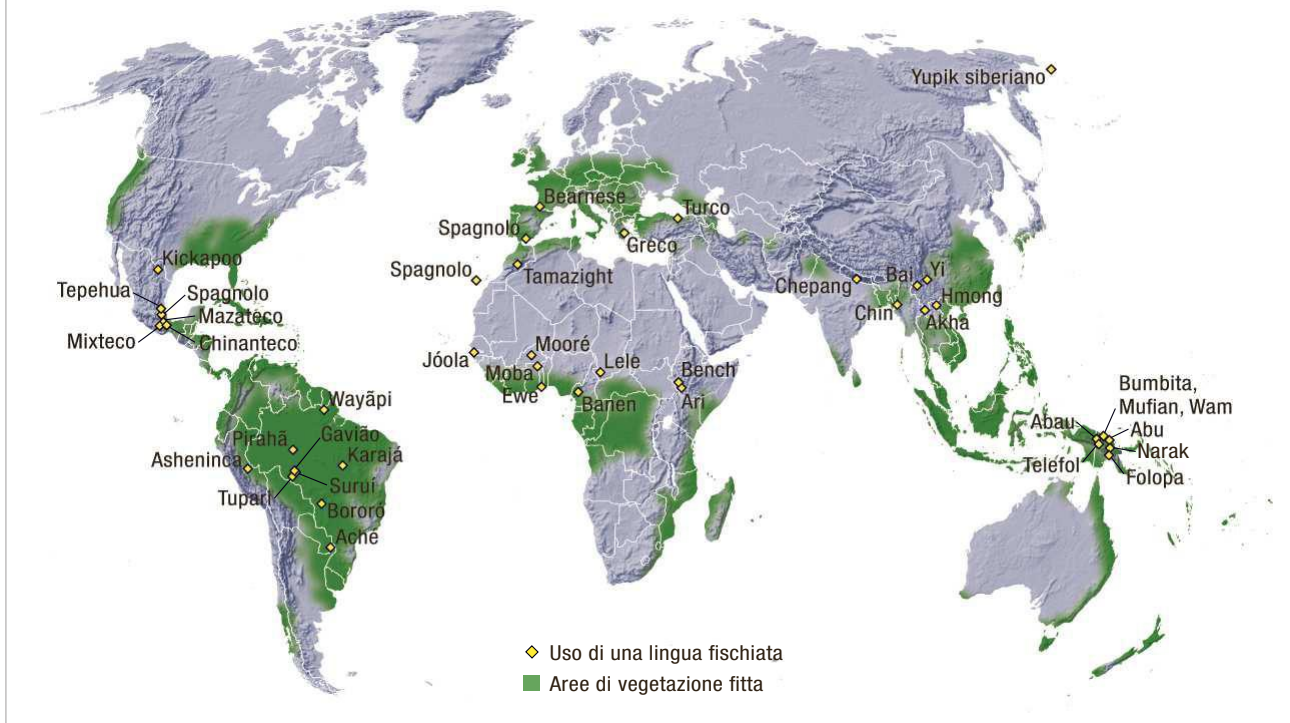
Questo studio mi ha ispirato a iniziarne un altro, pubblicato nel 2013, in cui insieme con i miei colleghi ho indagato sull'intelligibilità delle parole pronunciate da interlocutori sempre più lontani tra loro. I risultati hanno indicato che, a una distanza di 17 metri, il riconoscimento delle parole scende al 70 per cento. Inoltre abbiamo scoperto che le consonanti riconosciute meglio (le sibilanti che somigliano a suoni come i fischi) sono ancora riconosciute con una frequenza superiore al 90 per cento a una distanza fino a 33 metri. Insieme con il lavoro di Busnel sul turco fischiato, questi risultati fanno intuire che il linguaggio fischiato sia più efficiente del normale linguaggio parlato quando gli interlocutori comunicano a distanze medie, dai 20 ai 30 metri.

Sempre nell'ambito della linguistica, ero curioso di sapere a che velocità si possono imparare i rudimenti del linguaggio fischiato. Tradizionalmente, a un bambino si insegna a fischiare poco dopo che comincia a parlare, ma abbiamo deciso di analizzare i primi passi dell'apprendimento del linguaggio fischiato negli adulti. Ho fatto ascoltare il silbo gomero a 40 studenti universitari, di lingua francese e spagnola. Abbiamo rilevato che distinguevano

Dove il mondo parla fischiando

Negli ultimi 15 anni, il numero delle lingue fischiate conosciute è aumentato a circa 70, partendo dalla dozzina identificata inizialmente da antropologi, missionari e viaggiatori. La mappa indica quelle studiate o registrate. Con

i progressi della ricerca se ne scopriranno altre, purché lo stile di vita tradizionale dei parlanti non sia minacciato dalla modernità. Spesso si usano per comunicare su lunghe distanze in zone montuose o coperte da foreste.



Secondo recenti studi, le lingue fischiate
possono permetterci di capire meglio come il cervello
elabora le informazioni uditive

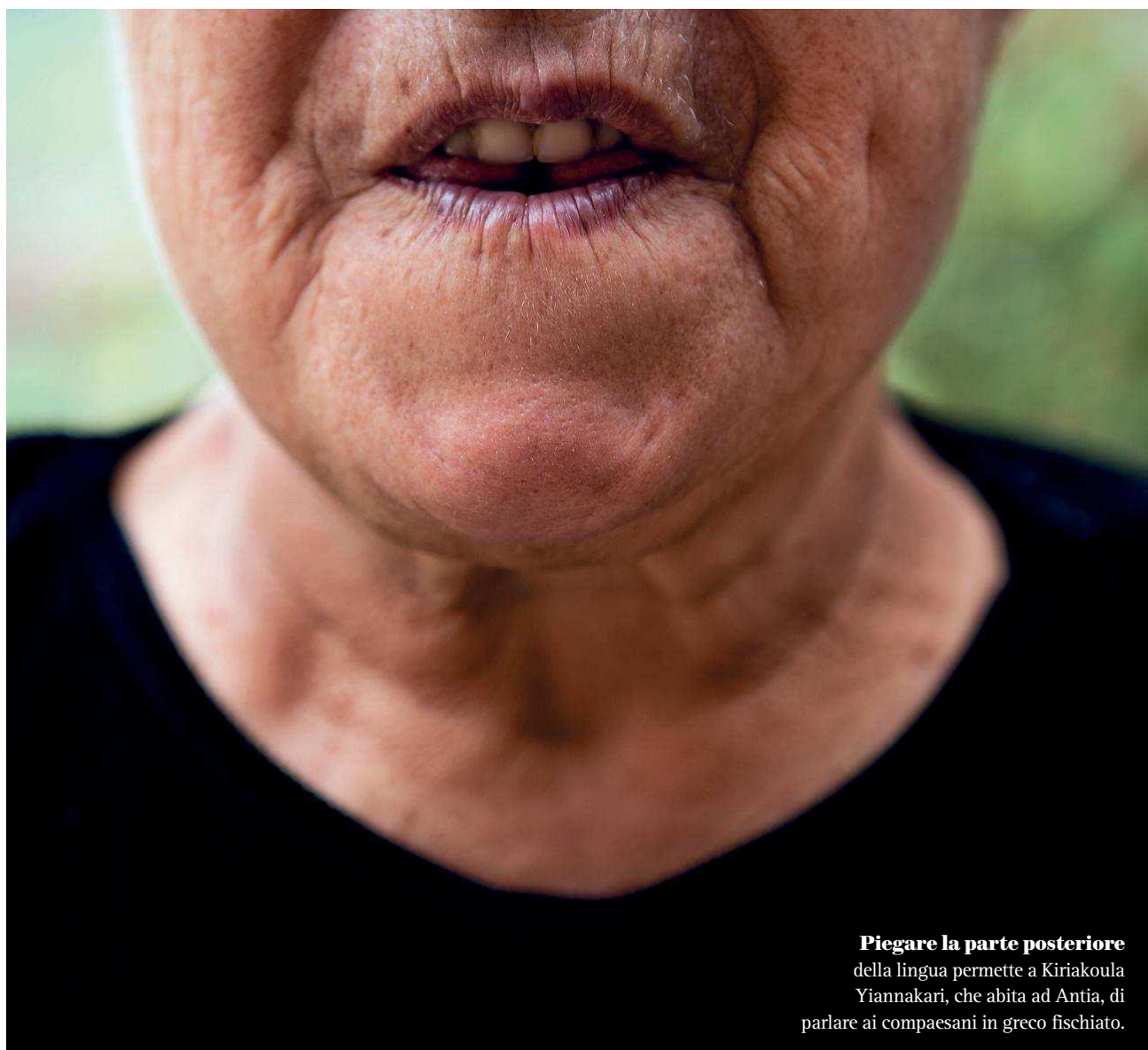
facilmente un componente palese di una qualsiasi parola spagnola fischiata – le vocali «a», «e», «i» od «o» (in silbo gomero la «u» si fischia come una «o») – e che gli spagnoli erano un po' più precisi rispetto ai francesi. Entrambi i gruppi di studenti hanno classificato le vocali con una precisione non imputabile al caso, anche se meno bene rispetto a un parlante di silbo esperto.

Entrambi gli emisferi

La neurobiologia dei fischi è un settore ancora poco esplorato: i ricercatori hanno appena cominciato a osservare che cosa accade nei centri cerebrali del linguaggio quando si parla con i fischi. Ma abbiamo fatto qualche progresso. Secondo uno studio pubblicato nel 2005 su «Nature» da Manuel Carreiras, allora presso l'Università di La Laguna a Tenerife, nelle isole Canarie, e dai suoi colleghi, nelle persone che conoscono le lingue fischiate l'ascolto del silbo gomero determina l'attivazione delle aree cerebrali deputate alla comprensione del linguaggio, cioè le regioni temporali dell'emisfero sinistro. Questa scoperta ha fatto ritenere che le stesse aree, notoriamente collegate al linguaggio, possano elaborare le parole

da un semplice segnale uditivo, formato da cambiamenti di altezza (come in una melodia musicale), nei fischiatori esperti, ma non nelle persone che non conoscono il linguaggio fischiato.

Un altro ricercatore ha voluto scoprire se tutto si possa spiegare con la concentrazione dell'attività cerebrale nell'emisfero sinistro. Onur Güntürkün, dell'Università della Ruhr a Bochum, in Germania, ha arruolato persone che conoscono il turco fischiato per verificare l'idea convenzionale che l'elaborazione del linguaggio avvenga per lo più nell'emisfero sinistro. Studi precedenti avevano dimostrato che in effetti l'emisfero sinistro è il centro del linguaggio dominante, per le lingue tonali e non tonali, ma anche per quelle schioccanti e dei segni, non vocalizzate. Güntürkün voleva capire in che misura, nel caso di una lingua fischiata, fosse coinvolto anche l'emisfero destro, associato all'elaborazione di melodia e altezza. Nel 2015 ha riferito su «Current Biology» che gli abitanti di Kuşköy, ricevendo test dell'udito, usavano entrambi gli emisferi quasi allo stesso modo quando ascoltavano le sillabe fischiate, ma soprattutto il sinistro con quelle parlate. Questo risultato ha bisogno di un'ulteriore conferma con altre lingue fischiate.



Piegare la parte posteriore della lingua permette a Kiriakoula Yiannakari, che abita ad Antia, di parlare ai compaesani in greco fischiato.

ma mette in discussione l'idea prevalente per cui l'emisfero sinistro sia dominante nella comprensione del linguaggio.

Questi studi dimostrano che le lingue fischiate possono contribuire a farci capire meglio come il cervello elabora le informazioni. Attualmente sto promuovendo queste attività di ricerca come membro di due organizzazioni: nel 2002 è nata la World Whistles Research Association, mentre nel 2015 una nuova iniziativa sul linguaggio fischiato è stata lanciata dal mio laboratorio (GIPSA-lab) al francese Centre national de la recherche scientifique.

Inoltre gli scienziati che studiano le lingue fischiate potrebbero ricevere uno stimolo dalle prime iniziative per conservare queste straordinarie forme di comunicazione che appartengono al patrimonio culturale di varie popolazioni. Sotto questo aspetto le isole Canarie si sono mosse per prime: nel 1999 a La Gomera è stato introdotto l'insegnamento obbligatorio del silbo gomero. Inoltre è stato istituito un programma governativo per formare insegnanti di lingua fischiata. Da allora il desiderio di ripristinare il silbo ha ispirato iniziative come l'associazione culturale e di ricerca Silbo Canario Hautacuperche, un'organizzazione che offre corsi di lin-

gua fischiata, ed è stata perfino lanciata una *app*, Yo Silbo, con cui si impara ascoltando frasi fischiate correttamente.

Se le attività di questo tipo saranno efficaci, «fare un fischio» non sarà solo un modo di dire: così si potrebbe conservare una forma di espressione che fa nuova luce su come elaborare semplici toni ad alta frequenza per trasmettere pensieri complessi. ■

PER APPROFONDIRE

Typology and Acoustic Strategies of Whistled Languages: Phonetic Comparison and Perceptual Cues of Whistled Vowels. Meyer J., in «Journal of the International Phonetic Association», Vol. 38, n. 1, pp. 69-94, aprile 2008.

The Study of Tone and Related Phenomena in an Amazonian Tone Language: Gavião of Rondônia. Moore D. e Meyer J., in «Language Documentation & Conservation», Vol. 8, pp. 613-636, 2014.

Whistled Languages: A Worldwide Inquiry on Human Whistled Speech. Meyer J., SpringerVerlag, 2015.

Whistled Turkish Alters Language Asymmetries. Güntürkün O. e altri, in «Current Biology», Vol. 25, n. 16, pp. R706-R708, 17 agosto 2015.

World Whistles Research Association: www.theworldwhistles.org.

NEUROSCIENZE

Studi recenti dimostrano che i danni prodotti dalle radiazioni cosmiche sul cervello degli astronauti potrebbero essere più gravi di quanto pensassimo.

Vivere e viaggiare nello spazio sarà mai possibile?

di Charles L. Limoli

Lo spazio può attendere







Charles L. Limoli è neuroscienziato ed esperto di biologia delle radiazioni. Insegna alla School of Medicine dell'Università della California a Irvine e studia in particolare i danni cognitivi causati da varie terapie antitumorali e dalle radiazioni cosmiche.



li esseri umani guardano le stelle e sognano di viaggiare nello spazio da millenni. Ora che abbiamo passeggiato sulla Luna e vissuto in orbita sulla Stazione spaziale internazionale, sembra inevitabile avventurarci più lontano: fino a Marte, al resto del sistema solare e oltre. È un sogno che accomuna moltissime culture e che tiene impegnate le agenzie spaziali di tutto il mondo.

Eppure sappiamo bene che lo spazio è pericoloso. Lasciando la Terra gli astronauti affrontano il freddo estremo, l'assenza di atmosfera, la microgravità e l'esposizione a radiazioni. Sono pericoli che finora sembrava possibile superare grazie a soluzioni tecnico-ingegneristiche e al coraggio di uomini e donne pronti a viaggiare tra le stelle. Ma studi recenti, inclusi i miei, hanno dimostrato che le radiazioni cosmiche possono causare più danni di quanto pensassimo, soprattutto al cervello umano, così fragile ma vitale. Sebbene gli scienziati sappiamo bene da decenni che lo spazio è radioattivo, le prove di quanto possono essere gravi e duratori gli effetti di queste radiazioni sul cervello umano emergono solo ora.

Gli esperimenti che io e i miei colleghi abbiamo condotto sui topi ci hanno permesso di rilevare danni cognitivi significativi e duraturi causati dall'esposizione alle radiazioni; se, come è probabile, danni simili si riscontrassero anche negli esseri umani, le missioni spaziali del futuro potrebbero non avere mai successo. Gli astronauti sulla Stazione spaziale internazionale (ISS) rimangono a una quota relativamente bassa, ai bordi dell'atmosfera terrestre, e questo li tiene parzialmente al riparo dai danni cognitivi. Ma i rischi di un viaggio su Marte, o anche oltre, potrebbero essere terribili.

Al momento la nostra capacità di mitigare i rischi è limitata. Sistemi di schermatura migliori potrebbero proteggere le navicelle spaziali da una parte delle radiazioni, ma nessun materiale conosciuto è abbastanza leggero da essere utilizzabile. La ricerca sui farmaci che potrebbero contrastare gli effetti delle radiazioni nel corpo è appena all'inizio. Dunque, a meno che non si trovi una soluzione, il sogno dell'umanità di viaggiare nel sistema solare, o ancora più lontano, potrebbe rimanere un sogno per sempre.

La potenza delle particelle

La radiazione cosmica è pericolosa: non la possiamo né vedere né sentire, ma riempie ogni millimetro di quello che ci sembra spazio vuoto, e può arrecare danni considerevoli ai tessuti umani. Il pericolo più grande per gli astronauti sono i raggi cosmici galattici (o GCR, acronimo dell'inglese *galactic cosmic rays*): nuclei atomici carichi di energia che volano quasi alla velocità della luce, e che secondo gli astronomi potrebbero derivare dai cosiddetti re-

sti di supernova di stelle ormai spente. Anche il Sole emette protoni (ovvero idrogeno ionizzato) di diverse energie, ma sebbene questi costituiscano la maggior parte delle radiazioni nello spazio, la loro massa molto leggera li rende decisamente meno dannosi per il nostro corpo rispetto a particelle più pesanti. I GCR pervadono lo spazio in modo uniforme con particelle abbastanza cariche di energia da attraversare gli scafi delle navicelle spaziali e i corpi degli astronauti. I campi magnetici intorno alla Terra proteggono gli abitanti del pianeta dirottando la maggior parte di queste particelle cosmiche lontano dalla superficie terrestre, ma viaggiare oltre la magnetosfera comporta l'inevitabile esposizione ai danni provocati dall'interazione tra radiazioni e tessuti umani.

Il problema è che quando le particelle cariche passano attraverso il nostro corpo lasciano un residuo di energia che «ionizza» gli atomi nei tessuti, ovvero scalza via gli elettroni dagli atomi, riportandoli dal loro stato neutro a quello di ioni carichi. Le particelle cariche poi continuano lungo la loro traiettoria, scalzando altri elettroni liberi e generando tracce secondarie, lasciando una scia di danni sempre più ampia. Più pesanti sono le particelle radioattive, più energia hanno, più atomi possono ionizzare.

La ridistribuzione degli elettroni porta alcuni atomi a rompere i loro legami molecolari, danneggiando proteine, lipidi, acidi nucleici e altre molecole vitali nelle cellule e nei tessuti del corpo. La rimozione degli elettroni produce radicali liberi, ovvero atomi o molecole che – non avendo tutti gli elettroni necessari a riempire le loro orbite atomiche – sono altamente reattivi e prontissimi ad apparire con altri elettroni appartenenti ad atomi o molecole vicini. I radicali liberi possono poi reagire con altre molecole nell'organismo, trasformandole in nuove sostanze che non possono espletare il compito che avevano in origine. Quando questi radicali si imbattono in una molecola di DNA, per esempio, possono danneggiarne le basi oppure spezzare parte della sua «spina dorsale» composta di fosfati e zuccheri.

Gli scienziati misurano l'esposizione alle radiazioni in termini di «dosi assorbite», ovvero di energia persa dalla radiazione e depositata nel corpo (per unità di massa corporea). L'unità del sistema internazionale per la dose assorbita è il gray (Gy), dove 1 Gy è

IN BREVE

Viaggiare nello spazio è sempre stato pericoloso, ma recenti studi dimostrano che le radiazioni cosmiche sono ancora più dannose di quanto pensassimo per il cervello.

I topi esposti in laboratorio a particelle cariche che simulano le radiazioni cui sono esposti gli astronauti nello spazio mostrano segni sia di declino comportamentale sia di danno neuronale.

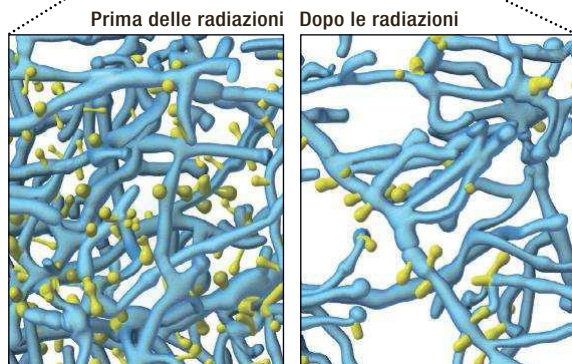
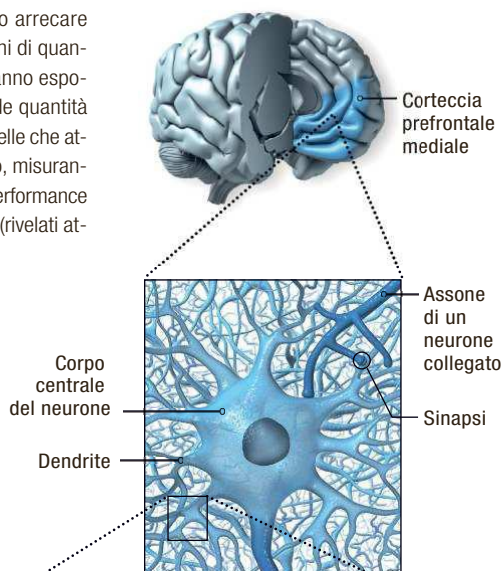
Perché l'umanità possa avere un futuro tra le stelle sarà necessario sviluppare farmaci che proteggano il cervello e sistemi migliori di schermatura per navicelle e tute spaziali.

Un cervello spaziale

Le radiazioni cosmiche potrebbero arrecare al cervello degli astronauti più danni di quanto si pensasse. Alcuni scienziati hanno esposto topi da laboratorio a una grande quantità di particelle cariche per simulare quelle che attraversano costantemente lo spazio, misurandone poi gli effetti in termini sia di performance comportamentale sia di danni fisici (rivelati attraverso *brain imaging*).

Radiazioni simili alle radiazioni cosmiche hanno danneggiato una regione del cervello dei topi detta corteccia prefrontale mediale, associata alle funzioni di memoria. In quest'area, le diramazioni neuronali dette spine dendritiche si sono ridotte sia di numero sia di dimensione.

I dendriti ricevono segnali chimici da altri neuroni. Otto settimane dopo l'esposizione a 30 centigray di radiazioni, è stata registrata nei topi una riduzione del 20-40 per cento nel numero di spine dendritiche (*in giallo*), le diramazioni dei dendriti che svolgono funzioni fondamentali per l'apprendimento e la memoria.



pari a un joule per chilogrammo. Le radiazioni possono anche essere classificate in base alla densità della ionizzazione che producono per unità. Gli scienziati distinguono le radiazioni in diversi tipi a seconda del loro trasferimento lineare di energia (o LET, *linear energy transfer*), ovvero la quantità di energia persa per unità di distanza percorsa. Per esempio, una dose di radiazione ad alto LET è più pericolosa della stessa dose di una radiazione a basso LET, perché si lascia alle spalle più energia e quindi porta alla ionizzazione di un maggior numero di atomi. Il danno che ne deriva è quindi più difficile da riparare per le cellule, che fatteranno di più a ripristinarsi. Purtroppo molti tipi di radiazioni presenti nei GCR hanno un LET relativamente alto, e questo, come vedremo più avanti, ha importanti conseguenze per i viaggi nello spazio profondo.

Le particelle radioattive più pesanti e più cariche di energia possono lasciare scie più dense di radicali liberi e danni da ionizzazione più gravi rispetto alle particelle con massa più ridotta. A livello molecolare si sono riscontrate aree ad alta densità di radicali larghe anche un nanometro, che possono portare a una grande concentrazione di siti danneggiati su molecole fondamentali concentrate in volumi ridotti. Dunque le particelle cariche più pesanti produco-

no danni molto più fitti e numerosi rispetto alle radiazioni fotoniche come i raggi X o i raggi gamma. È questa densità a rendere le radiazioni cosmiche più pericolose delle radiazioni ionizzanti che si trovano solitamente sulla Terra.

Ricreare lo spazio sulla Terra

Nonostante la pervasività delle particelle cariche nello spazio, riprodurre questo tipo di campi radioattivi sulla Terra per studiarne gli effetti è una sfida considerevole. Uno dei pochissimi luoghi dove è possibile condurre esperimenti simulando radiazioni cosmiche è il NASA Space Radiation Laboratory, una struttura costruita a Long Island dalla NASA e dal Brookhaven National Laboratory nel 2003. Qui, grandi acceleratori di particelle sono in grado di far arrivare ioni di varie masse a velocità che si avvicinano a quelle delle radiazioni cosmiche. I ricercatori come me collocano bersagli – topi, nel mio caso – lungo la traiettoria di queste radiazioni, e ne misurano gli effetti. Con questi test è possibile valutare le conseguenze sui tessuti viventi di vari tipi di radiazioni, emesse in varie dosi.

In uno dei nostri esperimenti più recenti abbiamo esposto topi di sei mesi a basse dosi di particelle cariche (tra 0,05 e 0,30 Gy di ossigeno e titanio, per esempio), sottoponendoli poi a test comportamentali. Abbiamo elaborato due prove mirate al riconoscimento di oggetti nuovi (NOR, *novel object recognition*) e al posizionamento degli oggetti (OiP, *object in place*), per valutare l'effetto delle radiazioni su memoria

e pensiero. Per prima cosa abbiamo messo i roditori in una scatola vuota grande circa un metro quadrato. Poi abbiamo aggiunto dei Lego, delle papere di plastica e altri giocattoli, lasciando che i topi esplorassero liberamente per un po'. In un secondo momento – pochi minuti, poche ore o un giorno dopo – abbiamo scambiato i giocattoli con altri nuovi (NOR) oppure li abbiamo spostati in posizioni diverse (OiP). Un animale intelligente e sano cerca le novità e dedica più attenzione ai giocattoli nuovi o alle modifiche nello spazio e meno a ciò che è rimasto uguale a prima; un topo «danneggiato» passa meno tempo a esplorare. Questi test permettono di misurare in modo affidabile vari tipi di funzioni ipocampali (memoria e apprendimento) e corticali (pensiero). Abbiamo misurato la performance degli animali attraverso un indice di discriminazione calcolato come rapporto tra il tempo passato sull'oggetto o sulla posizione nuovi e il tempo totale passato a esplorare le due situazioni, sia prima sia dopo.

I nostri esperimenti NOR e OiP hanno dimostrato che l'esposizione alle radiazioni nei topi abbassa questo indice di discriminazione in misura significativa. Dopo sei settimane la performance dei topi (esposti a 5 o 30 cGy, ovvero centigray) è peggiorata di circa il 90 per cento, con una costanza sorprendente, nonostante

la differenza tra le dosi. Inoltre i test più recenti indicano che questi effetti durano 12, 24 o anche 52 settimane dopo l'esposizione. Questo suggerisce che l'esposizione a livelli simili di radiazioni cosmiche può creare gravi problemi in astronauti impegnati in missioni in cui devono prendere decisioni cruciali e risolvere problemi inattesi.

La potatura dell'albero neuronale

Dopo questi primi esperimenti, i miei colleghi e io abbiamo condotto uno studio di *brain imaging* su alcune sezioni del cervello dei topi sottoposti a radiazioni. Le particelle cariche di energia che li avevano attraversati potevano aver prodotto cambiamenti profondi nei loro circuiti neuronali, e speravamo di osservare danni fisici specifici che si potessero mettere in correlazione con i cambiamenti comportamentali registrati. Per riuscirci abbiamo usato topi geneticamente modificati perché il loro cervello contenesse neuroni fluorescenti facili da vedere al microscopio ad alta risoluzione. Abbiamo collezionato una serie di immagini fluore-

dello spessore di un capello) che si estendono dal fusto principale del dendrite e permettono l'apprendimento e la memoria. Se i dendriti sono come i rami di un albero, le spine dendritiche sono come le foglie sui rami: contengono le strutture sinaptiche che permettono ai dendriti di ricevere i segnali neuronali e possono avere forma diversa a seconda della funzione. I nostri studi passati su raggi X e protoni e quelli più recenti sulle particelle cariche hanno rivelato la notevole sensibilità delle spine dendritiche alle radiazioni. Abbiamo scoperto che la loro densità (ovvero il numero di spine per unità di lunghezza) è notevolmente ridotta dopo l'esposizione a radiazioni, sia misurando dopo un periodo breve (dieci giorni) sia dopo un periodo più lungo (sei settimane). Questi effetti, gravi e persistenti, dimostrano che le particelle cariche possono causare conseguenze strutturali, ovvero cambiamenti che compromettono la capacità dei neuroni di gestire la neurotrasmissione perché riducono il numero di connessioni sinaptiche nel cervello.

A ulteriore conferma che i cambiamenti di comportamento dei topi derivavano dai cambiamenti osservati nei neuroni, abbiamo

misurato la correlazione tra i dati sulla performance con la densità delle spine dendritiche di ciascun animale. I grafici risultanti mostrano che la riduzione della densità delle spine dendritiche corrisponde all'indebolimento delle capacità cognitive. I soggetti che avevano dato le performance peggiori (mostrando minore curiosità o esplorando meno le novità) avevano anche la minore densità di spine dendritiche: questo suggerisce che i danni cognitivi fossero almeno in parte correlati al numero ridotto di spine dendritiche.

Questi dati sono la prima prova che collega i danni strutturali ai risultati comportamentali negativi osservati negli animali esposti a radiazioni simili a quelle cosmiche.

Questi risultati aiutano a confermare i sospetti che la NASA ha da anni, ovvero che le radiazioni siano dannose per le prestazioni cognitive degli astronauti. Finora questi erano timori basati in gran parte sulla letteratura clinica che documenta un'ampia gamma di effetti cognitivi sui pazienti malati di tumore al cervello e sopravvissuti alla radioterapia craniale. Ma in passato gli scienziati hanno esitato a trarre conclusioni per gli astronauti nello spazio perché si tratta di popolazioni diverse, esposte a tipi e a dosi di radiazioni diverse.

Nei casi clinici la dose tipica è di 2 Gy al giorno, e supera la maggior parte delle stime sulle dosi alle quali si potrebbe esporre un individuo durante un viaggio andata e ritorno per Marte e una lunga permanenza sul Pianeta Rosso. I tassi di dose interplanetaria sarebbero di circa 0,48 mGy (milligray) al giorno per i circa 360 giorni di viaggio tra andata e ritorno, e della metà durante la permanenza ipotizzata di uno o più anni (perché la massa del pianeta bloccherebbe le radiazioni in arrivo dal lato opposto). Tuttavia, anche se le dosi totali di radiazione usate nella radioterapia sono molto più elevate di quelle riscontrate nello spazio, bisogna tenere conto del fatto che i raggi X e i raggi gamma solitamente usati contro i tumori sono poco ionizzanti (hanno basso LET), mentre le particelle cariche di cui ci dobbiamo preoccupare nello spazio sono densamente ionizzanti (hanno alto LET). Questa differenza ci ha impedito di fare confronti efficaci tra gli esiti dei pazienti oncologici e ciò che possiamo attenderci per gli astronauti.

I risultati che abbiamo raggiunto vanno a sostengono della teoria che le radiazioni cosmiche siano dannose per il cervello degli

La necessità di proteggere gli astronauti dalle radiazioni cosmiche potrebbe essere il problema più grave tra quelli da superare per riuscire a realizzare missioni di esplorazione del sistema solare

scienti a varie profondità di specifiche aree del cervello, unendole poi in una rappresentazione 3D del cervello.

Questo lavoro di *imaging* ha mostrato che c'erano stati cambiamenti notevoli in parti dei neuroni dette dendriti, ovvero le strutture allungate che, come delle dita, si diramano dal corpo centrale della cellula neuronale per ricevere i segnali dagli altri neuroni (mentre strutture simili, dette assoni, trasmettono i segnali in uscita). Alcuni studi condotti in passato dal nostro laboratorio hanno dimostrato che le radiazioni dovute a raggi X o raggi gamma a basso LET causano riduzioni significative nella lunghezza, area e diramazione dei dendriti per periodi di 10 e 30 giorni. Nel complesso, questi cambiamenti costituiscono una riduzione della complessità dendritica, un parametro fondamentale, paragonabile ai rami della chioma di un albero. Un nostro studio pubblicato nel 2015 su «Science Advances» ha mostrato che anche dosi molto basse di particelle cariche possono causare perdite di complessità dendritica significativa e persistente.

Inoltre, questi cambiamenti colpiscono una particolare regione del cervello, la corteccia prefrontale mediale, che è coinvolta nella memoria, una delle funzioni che apparivano danneggiate nei nostri test comportamentali. Ciò non significa che non fossero danneggiate anche altre regioni del cervello o che non fossero corrotti altri circuiti neuronali, ma i nostri studi dimostrano quanto sia utile associare gli studi comportamentali al *brain imaging*, per ricondurre il declino cognitivo osservato con i cambiamenti strutturali rilevati in specifiche aree cerebrali.

Abbiamo proseguito la ricerca con un'ulteriore analisi di *brain imaging* ad alta risoluzione, a caccia di prove di altre alterazioni strutturali. Ci siamo concentrati per esempio sulle spine dendritiche, piccole diramazioni di meno di un micrometro (una frazione

astronauti, ma con alcune importanti riserve. Abbiamo usato dosi di radiazione simili a quelle di un ipotetico viaggio spaziale, ma non abbiamo potuto simulare il tasso di radiazione che investirebbe gli astronauti: nello spazio ci vorrebbero svariati mesi, se non anni, per raggiungere la stessa dose con il protrarsi dell'esposizione alla radiazione cosmica. Poiché avevamo a disposizione l'acceleratore solo per un periodo limitato, abbiamo dovuto sottoporre i topi alla stessa quantità di radiazione nell'arco di pochi minuti.

Questo può sollevare il dubbio che le cellule avrebbero invece il tempo di ripararsi e riprendersi da una dose ricevuta più lentamente. In realtà è poco probabile che l'effetto del tasso di esposizione sia così significativo per tre motivi: la dose totale è bassa (in altre parole, le particelle cariche sono poco dense), le radiazioni cosmiche più preoccupanti sono quelle ad alto LET (che producono danni cellulari gravi, dai quali è difficile riprendersi indipendentemente dalla velocità con cui viene «somministrata» la dose) e, infine, la maggior parte della aree del nostro cervello non sono in grado di generare con facilità nuovi neuroni, il che ostacola ulteriormente la guarigione. Infine, sebbene i nostri esperimenti siano stati condotti su topi e non su esseri umani, non abbiamo motivo di pensare che i nostri neuroni reagirebbero in modo sostanzialmente diverso alla radiazione cosmica rispetto a quelli di un roditore.

Abbiamo ancora un futuro nello spazio?

Prima di poter inviare esseri umani in una missione di esplorazione del sistema solare, dovremo superare ostacoli enormi. Per raggiungere Marte e gli altri corpi celesti intorno al Sole avremo bisogno di razzi più grandi e più potenti di quelli oggi a disposizione. Gli astronauti dovranno anche avere un habitat in cui vivere a lungo e strumenti che permettano loro di produrre acqua e carburante. Ora a questa lista si aggiunge l'esigenza di proteggere i coloni spaziali dalle radiazioni – e potrebbe essere il problema più serio.

Una prima soluzione potrebbe essere una schermatura che blocchi la radiazione prima che faccia danni, o sulla navicella spaziale e intorno all'habitat oppure sulle tute spaziali e sull'abbigliamento. Al momento l'unico modo che gli scienziati conoscono per schermarci dalle radiazioni si basa sull'uso di materiali estremamente spessi e pesanti, come il piombo: efficaci, ma estremamente poco pratici nello spazio, anche perché richiederebbero troppo carburante al momento del decollo. Oggi si stanno cercando e progettando nuovi materiali schermanti e controlli ingegneristici che potrebbero migliorare la capacità degli scafi di difendere alcune parti delle navicelle spaziali. Gli astronauti potrebbero rifugiarsi in quelle aree durante i momenti di maggiore attività solare e indossare caschi e tute progettati per massimizzare la protezione dall'esposizione alle radiazioni mentre passeggiano nello spazio, o anche mentre dormono. Ma per fare un vero passo avanti in questo senso sarebbe necessario un materiale protettivo decisamente migliore di qualsiasi alternativa oggi disponibile.

La ricerca è orientata anche allo sviluppo di farmaci o alimenti che gli astronauti potrebbero assumere regolarmente o dopo una forte esposizione alle radiazioni, per esempio dopo una forte tempesta solare, per mitigarne gli effetti più gravi sul cervello. Certi mix di antiossidanti, per esempio, sembrano promettenti nel limitare parte dei danni nei topi esposti a radiazioni che simulano

quelle cosmiche. Diversi scienziati stanno anche progettando sostanze che potrebbero sostenere i circuiti nel cervello in modo da mantenere funzionalità anche se ci sono stati danni. Ma la ricerca è ancora all'inizio, e non si vedono all'orizzonte possibili panacee: la speranza rimane al massimo quella di riuscire a ridurre i danni, non di eliminarli. Ed è necessario anche continuare la ricerca sugli effetti delle radiazioni cosmiche sul cervello, oltre che su tutto il resto del corpo, per chiarire più a fondo quali sono gli effetti di breve e di lungo periodo associati con esposizioni prolungate.

Le nostre scoperte indicano che lo spazio profondo potrebbe nascondere rischi che finora sono stati sottovalutati rispetto ad altri più noti. Per esempio abbiamo conoscenze più approfondite sui tumori indotti dalle radiazioni, che però potrebbero essere meno preoccupanti perché la maggior parte dei tumori radiogenici impiega molto tempo per svilupparsi. Per contro, abbiamo dimostrato che anche piccole dosi di radiazioni cosmiche possono causare danni neuronali e difetti cognitivi nei topi, ed è molto probabile che sia così anche negli uomini.

I ricercatori stanno sviluppando farmaci e diete speciali che possano contrastare e mitigare gli effetti nocivi delle radiazioni sul cervello. Ma siamo ancora solo all'inizio e non ci sono panacee all'orizzonte

Un'altra fonte di preoccupazione è la persistenza di questi cambiamenti indotti dalle radiazioni. Gli scienziati non hanno alcuna prova che la complessità dendritica e la densità delle spine possano autorigenerare dopo l'esposizione a radiazioni cosmiche; per quanto sia prematuro dichiarare che questi danni sono permanenti, di fatto non abbiamo prove che i neuroni ne possano guarire. Pertanto, fino a quando i ricercatori non riusciranno a trovare interventi specifici per promuovere o accelerare la guarigione dei tessuti cerebrali esposti a radiazioni, la scelta migliore sembra essere proteggere i circuiti neuronali che abbiamo.

L'esposizione alle radiazioni cosmiche potrebbe essere uno degli ostacoli più significativi al viaggio dell'uomo verso Marte, e ancora di più per le missioni più lunghe nello spazio profondo che servirebbero per esplorare mondi più lontani. Sebbene questi risultati siano considerati controversi da alcuni scienziati, è difficile ignorare questi dati e le loro possibili conseguenze sul programma spaziale.

Siamo dunque condannati a rimanere per sempre sulla Terra? Non è detto. Forse è solo uno dei tanti ostacoli che l'umanità dovrà affrontare e superare per prepararsi a partire per quella che potrebbe essere la nostra avventura più difficile e, forse, il nostro più straordinario successo. ■

PER APPROFONDIRE

Space Radiation Risks to the Central Nervous System. Francis A., Cucinotta e al., in «Life Sciences in Space Research», vol. 2, pp. 54-69, luglio 2014.

What Happens to Your Brain on the Way to Mars. Vipin K., Parihar e al., in «Science Advances», vol. 1, n. 4, articolo n. e1400256, maggio 2015.

Effetti biologici di radiazioni ionizzanti di basso livello. Arthur C. Upton, in «Le Scienze», n. 164, 1° aprile 1982.

BIOLOGIA

Le linee aeree



dei microbi

Droni volanti e teoria del caos servono ai ricercatori
per studiare i tanti modi in cui
i microrganismi si diffondono e fanno danni nel mondo

di David Schmale e Shane Ross

Fotografie di Adam Erwing

Decollo. In un campo nei pressi di Blacksburg,
in Virginia, i ricercatori lanciano un drone
appositamente modificato per raccogliere i
microrganismi in sospensione nell'aria.



L'aria intorno a noi pullula di minuscole vite. Con ogni respiro inaliamo migliaia di batteri, virus e funghi. Gli scienziati san-

no da quasi 150 anni che alcuni di questi microbi sospesi nell'aria provocano malattie in piante, animali domestici e persone. Più di recente abbiamo imparato che i microrganismi possono anche influenzare il tempo meteorologico, consentendo all'acqua di gelare a temperature meno basse e innescando precipitazioni. È stupefacente, ma qualcuno di questi microbi riesce ad attraversare oceani e continenti sulle grandi correnti dell'aria.

Nuovi strumenti e nuove tecnologie stanno aiutando gli scienziati a capire meglio da dove vengono questi organismi, come si diffondono e come i loro viaggi influiscono, spesso in modi inattesi, sul nostro mondo.

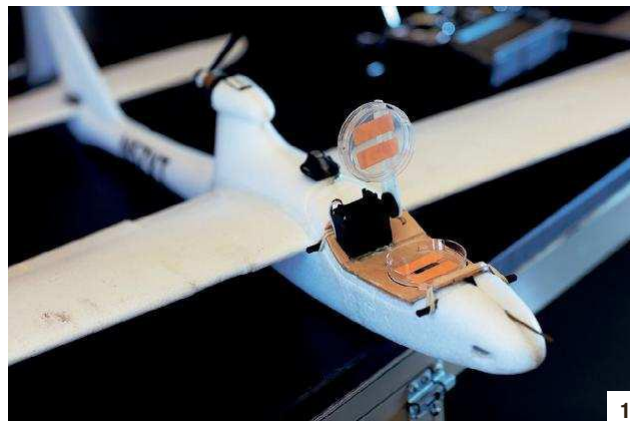
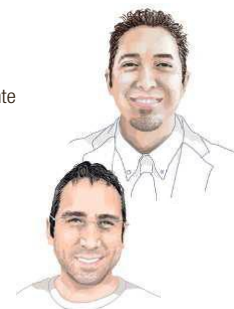
È più di un decennio che noi due ci occupiamo di certi agenti patogeni particolarmente pericolosi per i raccolti, che ogni anno causano miliardi di dollari di danni nel mondo, provocando una vasta gamma di problemi, fra cui ruggini delle colture e avvelenamenti da tossine. Uno di noi, Schmale, studia l'aerobiologia dei microrganismi che causano malattie delle piante; l'altro, Ross, sviluppa modelli matematici che descrivono e prevedono in che modo si muovono le correnti d'aria su distanze sia brevi che lunghe. Abbiamo iniziato a collaborare nel 2006 per trovare le rotte lungo cui si diffondono i patogeni vegetali da un campo coltivato all'altro, o da una regione o un continente all'altro.

A questo scopo (e siamo l'unica collaborazione di ricerca a farlo) abbiamo dispiegato una flotta di droni volanti equipaggiati con dispositivi di campionamento per raccogliere e analizzare i microrganismi degli strati inferiori dell'atmosfera.

Ogni missione ci restituisce una vasta gamma di organismi interessanti, molti dei quali sconosciuti alla scienza o poco studiati fino a quel momento. Abbiamo sviluppato nuovi strumenti per comprendere il trasporto dei microrganismi in atmosfera sulle

David Schmale è professore al Dipartimento di patologia e fisiologia vegetale e scienza delle piante infestanti del Virginia Tech.

Shane Ross è professore associato di sistemi dinamici e dinamica dei fluidi al Dipartimento di ingegneria e meccanica biomedica del Virginia Tech.



1

lunghe distanze e costruito nuove ipotesi su quanto lontano possano arrivare alcuni microbi sospinti dal vento; e in che modo possano contribuire a innescare pioggia, neve e altri tipi di precipitazioni.

In futuro il nostro lavoro potrebbe servire ai funzionari addetti all'agricoltura per tenere sotto sorveglianza i microrganismi patogeni portati dall'aria, prevedendo dove potranno spostarsi e quindi identificando i campi da trattare o mettere in quarantena. Informazioni che consentiranno ai coltivatori di decidere, fra l'altro, quali varietà colturali piantare o quando irrorare i campi con fungicidi o altri composti per proteggere i raccolti.

Gran parte delle nostre ricerche si è concentrata in particolare su *Fusarium graminearum*, un fungo patogeno che negli ultimi decenni si è diffuso più ampiamente e più in fretta che mai grazie anche ai cambiamenti climatici e alle pratiche agricole che limitano o evitano la lavorazione del terreno, accrescendo la quantità di residui vegetali che rimangono sui suoli e favorendo quindi la permanenza dell'infezione da un anno all'altro. Quando gli esperti di agricoltura, noi compresi, si preoccupano della possibilità che ulteriori innalzamenti della temperatura globale possano significativamente minacciare le disponibilità alimentari mondiali in un futuro prossimo, hanno in mente l'esplosiva diffusione di questo e di altri funghi che rendono i cereali inadatti al consumo umano.

IN BREVE

Una delle malattie più devastanti delle colture agricole è la fusariosi del culmo (FHB), che colpisce soprattutto orzo, avena e altri cereali da granella, e che con i mutamenti climatici ha iniziato a diffondersi in

nuove regioni del mondo. **Dato che il fungo** che provoca la FHB viaggia nell'aria, gli autori hanno lanciato droni e impiegato raffinate simulazioni per cercare di capire quali distanze possano coprire i patogeni.

Gli ultimi risultati mostrano che i microrganismi possono essere trasportati da vari sistemi meteorologici anche per decine o centinaia di chilometri, lungo vie aeree intricate e cangianti.

In futuro, questo lavoro potrebbe essere usato dagli agricoltori per proteggere i raccolti seguendo la diffusione dei patogeni vegetali e individuando le contromisure più valide.



2

Tossine nel cibo

Molte persone non sanno quanto possano essere devastanti per l'agricoltura i microrganismi patogeni. Una delle peggiori malattie delle piante è la fusariosi del culmo (FBH, dall'inglese *fusarium head blight*), che sbianca le cime di frumento, orzo, avena e altri cereali da granella, e ne riempie i chicchi di sostanze dette micotossine. Ingerite in quantità sufficienti, le micotossine danno forti disturbi alle persone e agli animali d'allevamento, spesso provocando il vomito. Dato che spesso è impossibile separare i chicchi contenenti le tossine da quelli sani, i raccolti devono essere analizzati, e se ne contengono più che tracce vanno distrutti.

Diverse specie del genere fungino *Fusarium* causano FBH in varie parti del mondo. *Fusarium asiaticum* è da tempo un problema nella Cina centrale, da dove di recente ha cominciato a diffondersi verso nord. *F. graminearum* predomina invece negli Stati Uniti, dove nel 1970 ha attaccato il mais, facendo ammalare un gran numero di maiali (l'episodio ha condotto alla scoperta del desossivalenolo, una micotossina che induce nei maiali vomito e rifiuto di alimentarsi). Controllare l'FHB è molto costoso, e ciò ha reso sempre meno redditizio piantare frumento in molti degli Stati americani in cui è tipicamente coltivato.

F. graminearum supera l'inverno nascondendosi nelle piante che rimangono sul terreno dopo il raccolto dell'anno precedente. In primavera ed estate su questi residui si sviluppano struttu-



3

Piano di volo. I droni usati per studiare i microrganismi nell'atmosfera inferiore portano piastre di Petri appositamente modificate che possono essere aperte e chiuse da terra (1). Il drone segue una rotta prestabilita (2). In laboratorio, poi, da una spora raccolta nell'aria si sviluppa una coltura pura di *Fusarium* (3).

la maggior parte dei ricercatori.

Invece di continuare a cercare le nostre particolari spore di *Fusarium* collocando piastre di Petri sul terreno a distanze sempre maggiori in giro per lo Stato, abbiamo deciso di cercare i microrganismi nell'aria al di sopra dei campi da studiare. Più alta la quota a cui avremmo trovato i microbi, più facile sarebbe stato usare qualcuno dei complessi calcoli matematici con cui i meteorologi seguono l'andamento del tempo per determinare la distan-

za fungine, dette periteci, che poi lanciano con forza nell'aria le spore di *Fusarium*. Queste arrivano sulle antere del frumento o sullo stilo delle infiorescenze femminili del mais; qui germinano, e il fungo si diffonde in tutta la pianta, provocando infine l'accumulo di micotossine nei grani. La facilità della contaminazione incrociata da una coltura all'altra è il motivo per cui gli agronomi sconsigliano di piantare frumento nei campi subito dopo aver coltivato mais o altre colture suscettibili alla FHB.

Muraglie d'aria

Uno degli obiettivi della nostra ricerca è capire in che modo i microrganismi sono trasportati nell'atmosfera su lunghe distanze. Come primo passo, abbiamo deciso di misurare la distanza che può percorrere nell'aria *F. graminearum*, partendo da un campo infetto, nel giro di un giorno o di una notte.

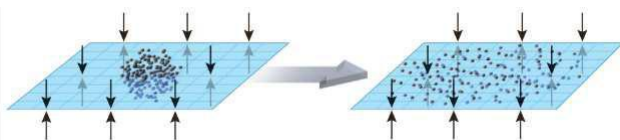
Finanziati dalla U.S. Wheat and Barley Scab Initiative [un programma contro la ruggine del grano e dell'orzo] e dal Virginia Small Grain Board [il Consiglio per i cereali da granella della Virginia], abbiamo condotto una serie di esperimenti in campi della Virginia dove si coltiva grano. Abbiamo preso un particolare ceppo di *F. graminearum* da noi isolato in un'altra area dello Stato e lo abbiamo caratterizzato fino al livello del DNA. In tal modo, potevamo distinguerlo dai ceppi già presenti nei campi che dovevamo studiare. Poi abbiamo sparso steli di mais infestati dal nostro fungo campione in un'area di circa mezzo ettaro, e disposto sul terreno una serie di piastre di Petri in modo che potessero catturare eventuali spore di *Fusarium* a varie distanze dal sito di inoculazione.

In un gruppo di esperimenti abbiamo recuperato spore del fungo campione a quasi un chilometro di distanza dal punto in cui era stato liberato inizialmente. Ma non c'era modo di capire se e quanto qualche spora poteva essersi allontanata ancora, perché ci eravamo dati la distanza limite di un chilometro. A quel punto, comunque, pareva chiaro che le spore di *Fusarium* potevano arrivare molto più lontano di quanto fin lì ipotizzato dal-

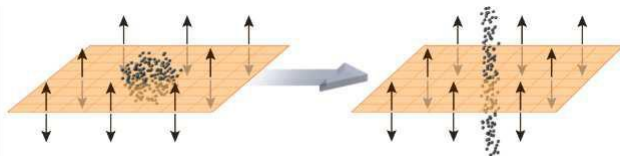
Muraglie d'aria

I movimenti dell'aria, come quelli di altri fluidi, generano andamenti semistabili — come la corrente a getto atlantica, per esempio — la cui forma è influenzata da «pareti» temporanee fatte d'aria, dette strutture lagrangiane coerenti (LCS), che ricadono in due grandi categorie: quelle che attraggono, principalmente, le correnti d'aria (e le particelle che possono contenere), e quelle che prevalentemente respingono le porzioni d'aria vicine. La complessa matematica che governa queste strutture (*qui sotto in azzurro e in arancione*) determina se una certa massa di particelle — per esempio di spore fungine — finirà per disperdersi lungo tutta la superficie della parete (1) o formerà una colonna sui due lati dell'LCS (2).

1 LCS attrattiva

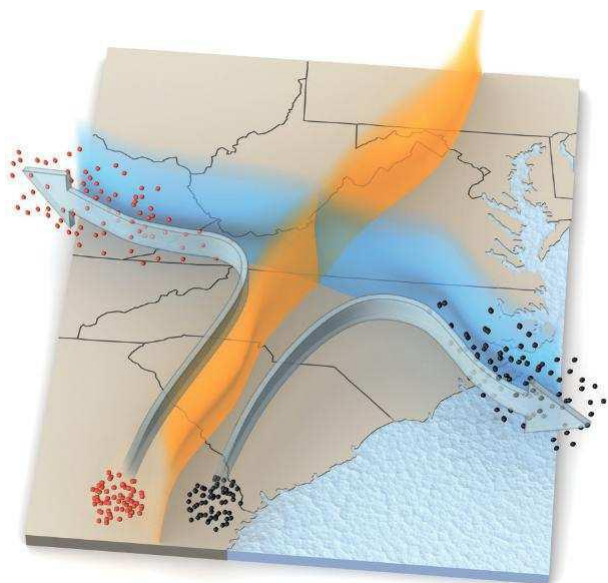


2 LCS repulsiva



Le LCS danno luogo a differenti andamenti dei flussi d'aria

L'intersezione di una LCS attrattiva (*in azzurro*) con una LCS repulsiva (*in arancione*) dà origine a un particolare flusso d'aria detto punto di sella. Nell'esempio qui sotto, due gruppi di particelle inizialmente piuttosto vicine viaggiano per centinaia di chilometri in direzioni opposte una volta passati per il centro del punto di sella.



za che, in teoria, avrebbero potuto percorrere. Quindi abbiamo modificato un certo numero di droni equipaggiandoli con appositi dispositivi di campionamento con cui raccogliere e analizzare i microrganismi durante il volo.

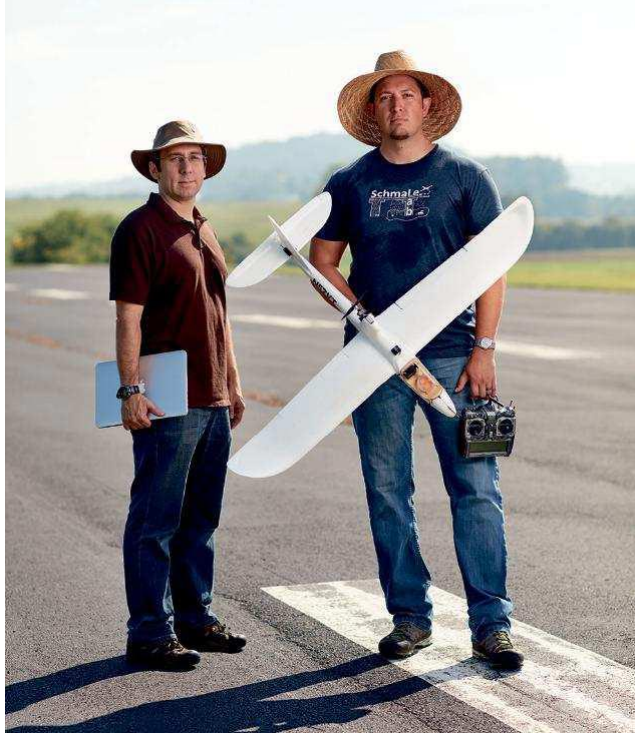
Finanziati dai programmi Emerging Frontiers e Dynamical Systems della National Science Foundation, abbiamo usato i droni per raccogliere qualcuna delle spore di *F. graminearum* che già aleggiavano sulle nostre teste nell'aria della Virginia. L'analisi dei dati raccolti suggerisce che alcuni di questi funghi fossero in volo già da parecchie ore, abbastanza per essere coinvolti in fenomeni meteorologici a larga scala estesi per centinaia di chilometri.

Ulteriori ricerche hanno rivelato che invisibili «muraglie d'aria», mobili e temporanee, hanno un ruolo di primo piano nel determinare quanto lontano arrivano questi funghi e dove vanno ad atterrare. Queste formazioni atmosferiche, formalmente dette strutture lagrangiane coerenti (LCS), si producono ogni volta che le correnti d'aria (o di qualunque altro fluido) si scontrano fra loro oppure si muovono intorno a un ostacolo, come può essere una montagna o l'ala di un aeroplano. Direzione e velocità iniziale delle correnti al momento del contatto determinano quali saranno le successive posizioni delle particelle, generando andamenti che si possono simulare al computer mediante la complessa matematica della teoria del caos e una branca specializzata della fisica detta dinamica non lineare.

Come ci si può attendere, queste temporanee muraglie d'aria sono tra i principali determinanti delle situazioni meteorologiche che osserviamo ogni giorno. Si è visto che gli intricati e cangianti andamenti delle LCS configurano, concentrano e suddividono l'aria sopra l'oceano Atlantico, per esempio, in modo che i venti di un uragano crescano di forza o si dissipino mentre la tempesta si sposta sull'acqua. Interfacce meno estese determinano come risalgono, precipitano e vorticano i patogeni che attraversano una valle, talvolta atterrando sui campi di una fattoria ma non di quella vicina. Seguendo le LCS nel tempo e nello spazio, abbiamo formulato ipotesi sulle direzioni da cui è probabile che possano venire varie minacce microbiche in una regione e sui luoghi verso cui potranno spostarsi ancora. Man mano che impariamo a sviluppare sempre meglio queste informazioni, i coltivatori potranno trovare utile consultare le nostre previsioni dei microbi come già fanno con quelle del tempo.

I funghi del genere *Fusarium* sono solo la punta di un iceberg. Dato che viaggiano nell'atmosfera, chiaramente i microbi non rispettano i confini internazionali. Un ceppo letale di ruggine nera del grano (Ug99) va in giro per il continente africano dai tardi anni novanta, quando è emerso in Uganda; i coltivatori australiani e nordamericani sono particolarmente preoccupati per la possibilità di un suo arrivo con le correnti atmosferiche che soffiano regolarmente sopra, rispettivamente, l'Oceano Indiano e l'Atlantico. La ruggine della soia è arrivata negli Stati Uniti dal Sudamerica con l'uragano Ivan del 2004; attualmente si nasconde nel sud del paese durante l'inverno e ogni anno rientra nel Nordest e nel Midwest lungo prevedibili percorsi aerei durante la stagione della crescita (il fungo non è in grado di sopravvivere agli inverni inclementi). Una coalizione di vari attori del settore agricolo è giunta a costituire una rete nazionale di monitoraggio per seguire ogni anno la diffusione stagionale di questo patogeno.

Curiosamente, molti di questi microrganismi non sarebbero di per sé in grado di sopravvivere a viaggi così lunghi nell'atmosfera. Una prolungata esposizione alle radiazioni ultraviolette del Sole, per esempio, può ucciderli. Ma i microbi che riescono ad ag-



Gli acchiappamicrobi. Ross (a sinistra) e Schmale (a destra) studiano il trasporto dei microrganismi lungo le autostrade del cielo.

gregarsi a particelle di polvere possono risultare protetti dai suoi raggi sterilizzanti. Scienziati come Dale Griffin, dello U.S. Geological Survey, hanno documentato l'esistenza di parecchi ben identificati corridoi globali di trasporto delle polveri, che collegano per esempio l'Africa all'Europa e all'Asia, o l'Asia agli Stati Uniti. Si stima anzi che in Florida arrivino ogni anno centinaia di milioni di tonnellate di polveri sahariane, compresi i microrganismi al loro seguito. Oltre a foschie e magnifici tramonti, queste nuvole di polvere possono provocare serie distruzioni ecologiche nelle zone su cui passano. Studi recenti suggeriscono che gli agenti eziologici di alcune malattie dei coralli dei Caraibi – in particolare, quello dell'aspergilliosi delle gorgonie – potrebbero esservi arrivati con le polveri africane. La crescente desertificazione dell'Africa nord-occidentale accresce il pericolo, dato che quantità crescenti di suolo marginalmente arido si riducono a polvere capace di trasportare e schermare un maggior numero di microbi in grado di uccidere le piante a mezzo pianeta di distanza.

Vento e acqua

Viaggiando nel cielo, i microbi non si limitano a diffondere malattie, ma possono anche contribuire a determinare che tempo fa sopra terre, laghi e oceani. I meteorologi sanno da tempo che tipicamente grandine, neve e pioggia cadono dal cielo solo dopo che si sono prodotti minuscoli cristalli di ghiaccio nelle nuvole. Se poi si formino o meno di fiocchi di neve o gocce di pioggia intorno al ghiaccio dipende da certe condizioni, fra cui la presenza di particelle – come quelle di fuliggine – che consentono all'acqua di gelare a temperature meno basse del solito. (L'acqua pura gela a temperature bassissime, che possono arrivare fino a -38 gradi.)

Nel 1982 David Sands, della Montana State University, e colleghi avevano postulato che anche qualche altra cosa – il batterio *Pseudomonas syringae* – potesse fare da nucleo per i cristalli di ghiaccio nell'atmosfera. Successive ricerche hanno suggerito un possibile meccanismo: certi ceppi di *P. syringae* presentano sulla superficie cellulare una particolare proteina che intrappola molecole d'acqua in modo che queste prendono a costituire un lat-

tice cristallino. Al suolo, i ceppi che producono le proteine che promuovono la formazione di ghiaccio possono far sì che la brina danneggi le colture. Ma i microbi possono anche arrivare fino alle nuvole, dove la temperatura è molto inferiore allo zero. Se i batteri sono abbastanza numerosi, pensò Sands, e producono abbastanza proteine di nucleazione del ghiaccio nel cielo, è concepibile che possano innescare la formazione di gocce di pioggia o fiocchi di neve.

Almeno, questa era l'idea. Dopo l'uscita del lavoro di Sand, i ricercatori hanno trovato grandi quantità di *P. syringae* in grossi campioni di pioggia e neve. Se poi i microbi siano i responsabili primari delle precipitazioni o si facciano più che altro dare un passaggio è difficile da provare. Ma i gestori delle stazioni sciistiche non hanno aspettato una risposta definitiva: molti di loro usano nuclei di condensazione contenenti pezzetti di *P. syringae*, commercialmente disponibili, per produrre neve artificiale nelle giornate invernali non abbastanza fredde.

L'ipotesi di Sands ci ha spinto a vedere se potevamo trovare qualche altro microrganismo capace di innescare precipitazioni nell'atmosfera. Con il sostegno del programma Dimensions of Biodiversity, della National Science Foundation, le ricerche condotte da Schmale e colleghi hanno mostrato che i microbi associati alle precipitazioni sono assai più diversificati di quanto ci si attendesse inizialmente. In Virginia, Boris Vinatzer e Schmale hanno raccolto in atmosfera e nelle precipitazioni molti tipi diversi di batteri e funghi che possono fare da nuclei di condensazione del ghiaccio, almeno in laboratorio. E la varietà dei microbi associati alle precipitazioni sembra essere differente a seconda delle località geografiche. Una migliore comprensione dei motivi per cui nell'una o nell'altra regione predomina un certo microbo o un altro potrebbe aiutarci a migliorare le previsioni degli andamenti meteorologici. E alla fine potremmo forse usare qualcuno di questi microrganismi per sviluppare qualche mezzo per far piovere nelle regioni aride o afflitte dalla siccità.

Da ultimo, speriamo di combinare ciò che abbiamo appreso sui microrganismi nelle goccioline d'acqua con i nostri calcoli sulle strutture lagrangiane coerenti per descrivere ciò che avviene nell'aria subito sopra la superficie di laghi, fiumi e oceani. Abbiamo già cominciato a raccogliere microbi sopra le acque con squadre di natanti senza pilota e droni volanti. Le equazioni matematiche necessarie a descrivere il modo in cui l'aria carica di microbi si mischia con le onde frangenti, i venti impetuosi o anche solo l'impatto e gli spruzzi delle gocce di pioggia sono più complesse di tutto ciò che abbiamo affrontato finora. Visto che l'acqua copre all'incirca il 70 per cento del pianeta, però, non abbiamo alcun dubbio che ciò che troveremo rivelerà novità affascinanti sui modi in cui i microrganismi viaggiano per il mondo. ■

PER APPROFONDIRE

Mycotoxins in Crops: A Threat to Human and Domestic Animal Health. Schmale III D.G. e Munkvold G.P., in «Plant Health Instructor». Pubblicato on line, 2009. www.apsnet.org/edcenter/intropp/topics/Mycotoxins/Pages/default.aspx.

Life in the Clouds. Ogden L.E., in «BioScience», Vol. 64, N. 10, pp. 861-867, ottobre 2014.

Highways in the Sky: Scales of Atmospheric Transport of Plant Pathogens. Schmale III D.G. e Ross S.D., in «Annual Review of Phytopathology», Vol. 53, pp. 591-611, agosto 2015.

The Surprising Importance of Stratospheric Life. Wald C., in «Nautilus», n. 37, Capitolo 1, 2 giugno 2016. <http://nautilus.us/issue/37/currents/the-surprising-importance-of-stratospheric-life>.

Muri d'acqua. Mackenzie D., in «Le Scienze» n. 541, settembre 2013.

ESPLORAZIONI

Le grotte più antiche





di Natalino Russo

La scoperta di grandi grotte in rocce di quasi 2 miliardi di anni fa apre nuove prospettive per lo studio dell'origine della vita

del mondo

Colonne naturali. Le morfologie colonnari che hanno dato il nome alla Galería Mil Columnas, dentro Imawari Yeuta, la grotta in quarziti più estesa esplorata finora, scoperta all'interno del monte, o tepui, venezuelano Auyan.

Natalino Russo, naturalista di formazione, scrive e fotografa per diverse testate di viaggio, esplorazione e montagna. Ha partecipato a decine di spedizioni speleologiche in tutto il mondo. Tra i suoi libri più recenti, *Il respiro delle grotte* (Ediciclo, 2013).



I tepui sono monti remoti e irraggiungibili. Svettano sulle distese della Gran Sabana venezuelana e si estendono fino all'Amazzonia brasiliana e colombiana. Lontani dai principali centri abitati, perennemente avvolti dalle nuvole e isolati da pareti vertiginose, questi monti sono sempre stati inaccessibili. Le popolazioni indigene li hanno eletti a dimora di divinità e li hanno venerati come templi, dando loro nomi evocativi.

Il tepui Auyan o Auyantepui è proprio uno di questi: in *pemón*, una delle lingue locali, significa «montagna del diavolo». Anche le ultime generazioni, ormai affrancate da credenze e superstizioni, quando volgono lo sguardo a queste montagne lo fanno con riverenza.

L'isolamento geografico ha contribuito a tenere i tepui in un limbo inesplorato, sovente accarezzato da fantasie letterarie e cinematografiche. L'Auyantepui, simbolo del Parco nazionale di Canaima, in Venezuela, è noto per il romanzo di Arthur Conan Doyle *Il mondo perduto* (pubblicato in Italia da Bompiani). Uscito per la prima volta nel 1912 con il titolo *The lost world*, è un classico della letteratura fantastica ispirata alla scienza. Racconta le sensazionali scoperte del professor Challenger su remote montagne del Venezuela rimaste isolate per milioni di anni.

Naturalmente sui tepui non vivono i dinosauri, ma le rare spedizioni esplorative organizzate lassù hanno spesso ottenuto grandi risultati. Si tratta di missioni complesse e costose, perché la maggior parte di queste montagne non è raggiungibile se non in elicottero.

Carsismi vecchi e nuovi

I tepui sono composti di quarzite, una roccia costituita per oltre il 95 per cento di silice, un composto di silicio e ossigeno, non solubile in acqua, quindi non carsificabile, come invece avviene per il carbonato di calcio. O meglio: non solubile secondo i tempi del carsismo classico. Nelle montagne costituite da rocce carbonatiche (per la maggior parte calcari) le acque meteoriche, provenienti dalle precipitazioni atmosferiche, tendono a infiltrarsi nel sottosuolo e a defluire verso valle formando estesi reticoli di drenaggio: gallerie, pozzi, sale che chiamiamo grotte. All'interno di queste cavità scorrono fiumi sotterranei che, al pari di quelli di superficie, ricevono l'apporto di svariati affluenti e poi finiscono in falda o riemergono dalle sorgenti di fondovalle. Questo model-

lo è ben studiato grazie a oltre un secolo di ricerche speleologiche nella maggior parte delle aree carsiche del mondo. Fino all'inizio degli anni novanta la comunità scientifica era concorde nell'affermare che nelle quarzite (quindi nei tepui) non potessero esistere simili reticoli di drenaggio. Si è ritenuto a lungo che qui l'acqua potesse infiltrarsi solo nelle fratture, e che quindi il drenaggio sotterraneo fosse limitato a sistemi verticali. In sostanza si pensava che nei tepui non potessero esistere grotte importanti.

Ma le recenti esplorazioni hanno trovato reticoli carsici anche nella quarzite. Questa roccia, di per sé assai poco solubile, può subire un processo di arenizzazione: la dissoluzione tra i granuli porta a un incremento di porosità, trasformando lentamente la quarzite in arenaria, una roccia facilmente erodibile.

Le esplorazioni hanno permesso inoltre di scoprire nuovi minerali e fornito elementi sufficienti a ipotizzare uno stretto legame tra processi biologici ed evoluzione del paesaggio.

Isole nel tempo geologico

Ma facciamo un passo indietro. Le quarzite sono rocce metamorfosate, cioè trasformate per effetto della pressione litostatica, esercitata dal peso di enormi spessori di sedimenti fluviali accumulatisi per milioni di anni.

Enormi ammassi di quarzite si trovano in Africa occidentale e nello scudo della Guyana, la porzione di Sud America composta da alcune tra le più antiche rocce conosciute. Queste rocce risalgono a circa 1,7 miliardi di anni fa, cioè a molto prima che si formasse il grande supercontinente chiamato Pangea, quello che 150 milioni di anni fa si frantumò aprendo il futuro Oceano Atlantico. Quest'ultimo evento innescò un lento processo di sollevamento per riequilibrio isostatico. La conseguente erosione modellò i *plateau* quarziticici fino a spianarli, o quasi: in Sud America, tra Brasile e Venezuela, sopravvivono alcuni relitti (*testigos*, testimoni) di quei vasti ammassi rocciosi. Sono appunto i tepui, colossali zoc-

IN BREVE

Le grotte, ambienti isolati dai cambiamenti esterni, sovente custodiscono meraviglie minerali e biologiche. Laboratori d'eccezione, possono essere usate per studiare

origine ed evoluzione della vita. **Un progetto internazionale** coordinato dal gruppo italiano La Venta esplora grandi cavità sotterranee nei cosiddetti tepui del

Venezuela e dell'Amazzonia brasiliana, monti composti di quarzite, al cui interno sono stati scoperti reticoli e grotte scavati dall'azione dell'acqua in rocce di

quasi 2 miliardi di anni fa. **Le missioni** nella più estesa grotta in quarzite finora esplorata hanno fornito informazioni importanti su geologia e forme di vita ospitate.



Nelle enormi gallerie della Cueva Akopán si distinguono chiaramente più livelli, corrispondenti a diverse fasi di erosione.

coli quarzitici isolati nelle piane fluviali amazzoniche. La sommità di queste montagne è caratterizzata da morfologie esasperate: torri, pinnacoli, baratri e profonde fessure. Un paesaggio che si è evoluto nel corso di decine di milioni di anni, un lasso di tempo superiore di almeno un ordine di grandezza rispetto a quelli necessari per modellare le aree carsiche convenzionali.

Tra Amazzonia brasiliana e Gran Sabana venezuelana si conoscono oltre 60 tepui, di cui sette con un'estensione superiore ai 100 chilometri quadrati e con altezze tra 2000 e quasi 3000 metri. Alcuni sono relativamente accessibili. È il caso del Cerro Roraima, al confine tra Venezuela, Brasile e Guyana. Questa montagna riceve ogni anno circa 4000 visitatori, principalmente turisti facoltosi appassionati di natura e lunghi trekking. Ma la maggior parte di queste montagne rimane assai remota e inesplorata. Molti tepui sono isolati da vaste zone di foresta e altissime pareti ricche di vegetazione, e non sono stati neppure scalati.

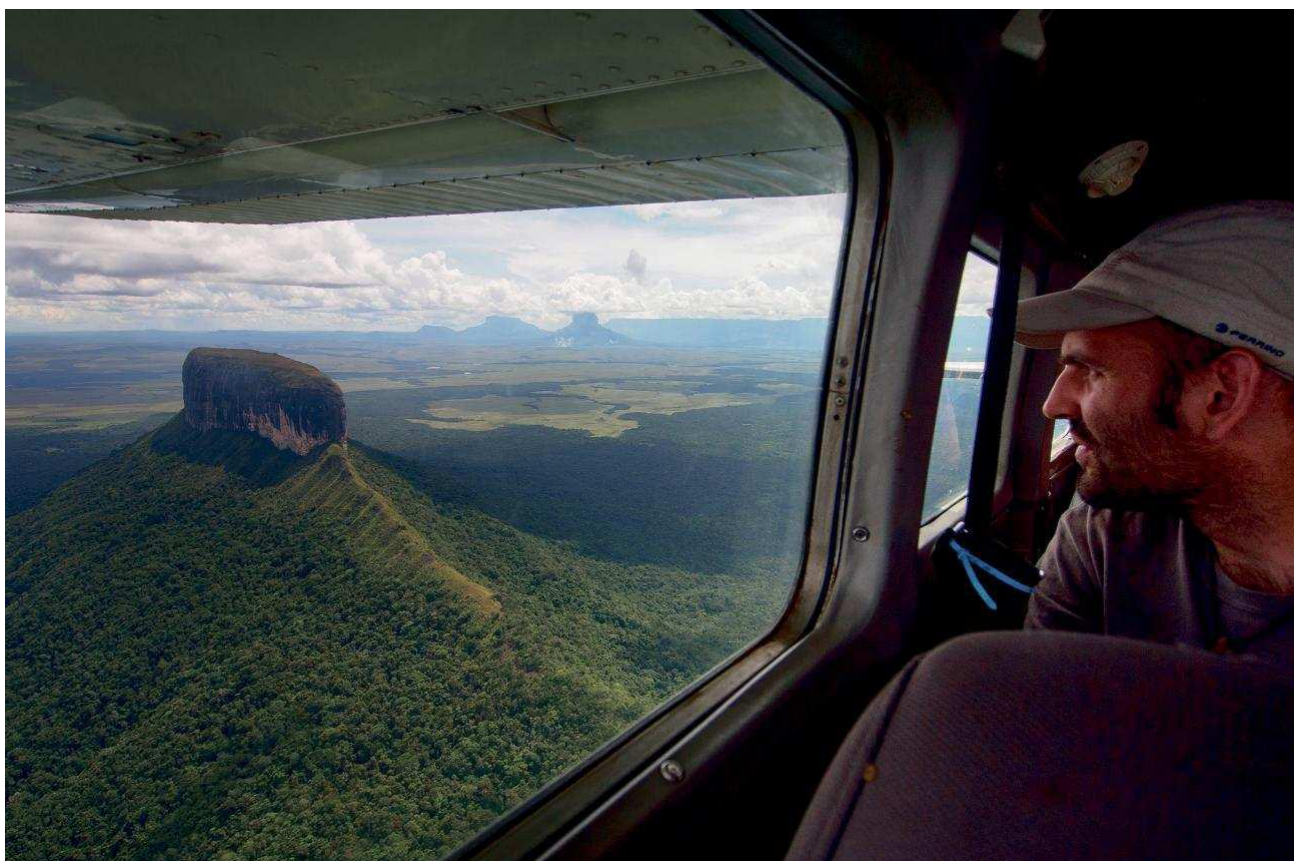
In questa vastissima regione non ci sono strade. I pochi villaggi indigeni sono raggiungibili solo con piccoli aerei in grado di atterrare su piste di terra battuta. Impossibile far arrivare questi velivoli sulla sommità accidentata dei tepui. È rimasta epica l'impresa del pilota statunitense Jimmy Angel, che nel 1937 riuscì ad atterrare sui terreni paludosi della cima dell'Auyantepui con un piccolo aereo Flamingo a otto posti, nel tentativo di raggiungere un'altissima cascata che precipitava dalle pareti del massiccio. Naturalmente per l'aereo fu impossibile ripartire, e la spedizione riuscì a tornare a valle solo dopo aver vagato per giorni in un labirinto di grandi fessure, canyon e pilastri di roccia. La cascata era la *Kerepakupai merú*, o *Parakupa vena*. Da allora è conosciuta con il nome del pilota: Salto Angel. Misura 979 metri, ed è la più alta caduta libera d'acqua del mondo.

Le spedizioni italiane

La morfologia articolata dei tepui e le grandi depressioni sulla loro sommità, ben visibili anche dalle foto satellitari, suggeriscono inequivocabilmente la presenza di cavità sotterranee. Tra gli anni settanta e ottanta, speleologi soprattutto venezuelani e polacchi vi avevano esplorato alcune grotte a sviluppo verticale.

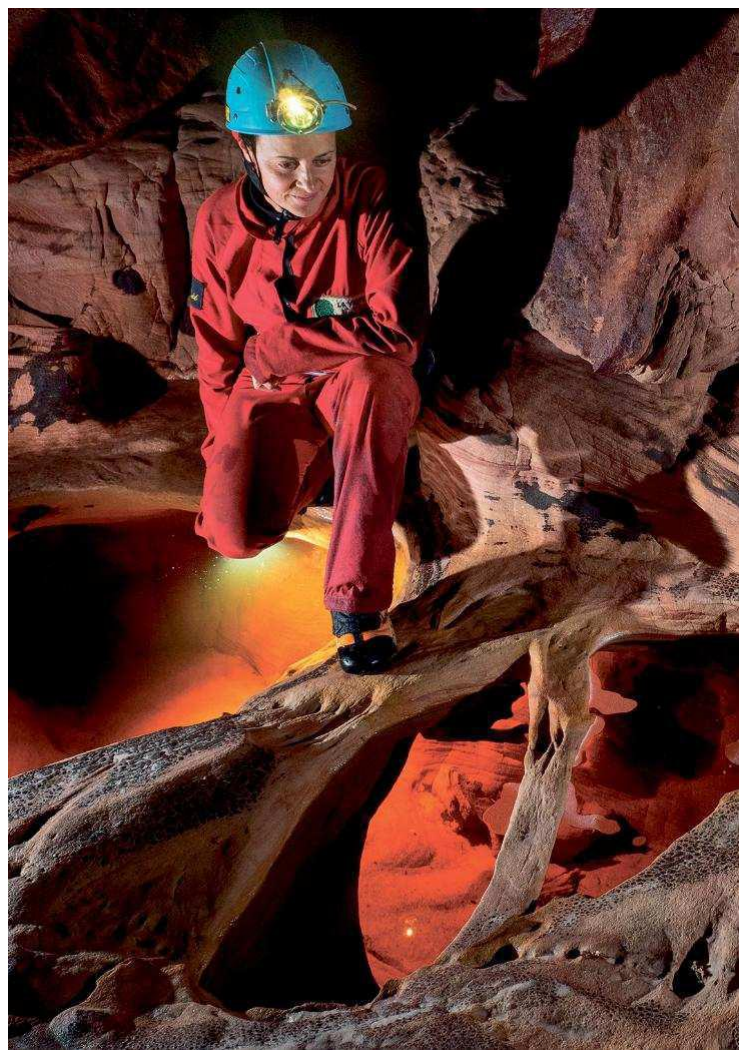
Nel 1993 una spedizione organizzata dal gruppo italiano La Venta insieme alla Sociedad Venezolana de Espeleología ha trovato sull'Auyantepui alcune gallerie a sviluppo prevalentemente orizzontale. È stata una scoperta importante perché ha introdotto un elemento nuovo in un mondo sotterraneo che fino ad allora si riteneva costituito esclusivamente da ambienti verticali. Questa esplorazione ha rilanciato la speleologia in quarzite e avviato il Progetto Tepui, che in oltre vent'anni ha visto dieci spedizioni sui tepui Auyan, Chimanta, Roraima, Sarisariñama e Aracá, in una vasta area tra Venezuela e Brasile. Fino a oggi il progetto ha esplorato oltre 40 chilometri di cavità sotterranee in quarzite.

Il vero punto di svolta nelle ricerche è costituito però da una scoperta fatta nel 2013: un ingresso sulla sommità dell'Auyantepui ha permesso agli speleologi di entrare in un reticolo sotterraneo di enormi proporzioni. La grotta ha andamento grossomodo orizzontale, ed è stata finora rilevata per oltre 20 chilometri. Al suo interno sono stati esplorati grandi ambienti, gallerie e pozzi. Come il salone dedicato a Paolino Cometti, un socio del gruppo La Venta scomparso pochi anni fa. Si tratta di un ambiente unico, lungo 270 metri e largo 150, che ha un volume complessivo stimato in un milione di metri cubi. Misure impressionanti, che ne fanno la grotta in quarziti più estesa esplorata finora. È stata chiamata Imawari Yeuta, «la casa degli dei» in lingua pemón.



Natalino Russo/La Venta (in alto e in basso a sinistra);
Natalino Russo/La Venta (in basso)

Visti da fuori. Francesco Sauro durante un recente sorvolo sulla zona dei tepui (*in alto*). Le morfologie sommitali dell'Auyantepui rispecchiano la struttura interna di queste montagne, estremamente fratturate e predisposte alla dissoluzione carsica (*in basso*).





Visti da dentro. Il crollo in cui si immette un copioso torrente, formando la cascata Ratö (*in alto*). In assenza di piogge il torrente scorre placido tra le forme di erosione della quarzite. Il colore rosso e le schiume galleggianti si devono ai composti di origine vegetale provenienti dall'esterno (*in basso*).



L'evoluzione del paesaggio sotterraneo

La bassa solubilità della quarzite fa sì che la formazione delle grotte in questa roccia sia molto lenta. Le grotte esplorate finora hanno un'età stimata tra i 20 e i 30 milioni di anni. Per buona parte del tempo questi ambienti sono rimasti isolati dagli altri ecosistemi, quindi possono essere considerati vere e proprie istantanee del passato, anche dal punto di vista biologico.

Precedenti ricerche avevano già ipotizzato un condizionamento dei fattori biologici sui processi di erosione di queste montagne. La superficie rocciosa dei tepui è infatti coperta da una pellicola organica (cianobatteri, funghi e licheni) che aggredisce chimicamente i grani di quarzo e i minerali che li tengono uniti.

Durante le spedizioni coordinate dal gruppo La Venta sono stati misurati alcuni parametri delle acque alla sommità dei plateau, nelle grotte e nei fiumi delle piane circostanti. In particolare sono stati raccolti dati su velocità di drenaggio, pH, conducibilità elettrica, temperatura e contenuto in silice. I campioni di roccia sono stati analizzati mediante osservazione al microscopio ottico ed elettronico, al diffrattometro e con fluorescenza ai raggi X.

Sembra che la maggior parte della silice disciolta in acqua provenga dalla dissoluzione del quarzo e solo in misura minima dalla scissione di altri silicati. Inoltre sulla superficie dei plateau la dissoluzione della silice – e la conseguente arenizzazione della quarzite – sarebbe rallentata dalla formazione di croste di composti chiamati idrossidi di ferro a causa dell'alternarsi in superficie di condizioni di evaporazione e condensazione. Queste patine rendono la roccia in superficie meno porosa e quindi più difficilmente arenizzabile. Nel sottosuolo invece questo processo è molto spinto, e fa sì che l'erosione meccanica sia la principale responsabile della formazione delle grotte.

Tuttavia l'erosione non è uniforme, si concentra maggiormente in determinati strati di roccia. L'analisi mineralogica dei livelli in cui si sviluppano le grotte ha permesso di individuare due tipi di quarzite: uno a contenuto in silice superiore al 95 per cento (e alta porosità primaria, cioè derivante dai processi di formazione della roccia: circa 4 per cento), l'altro ricco in fillosilicati (silicati dalla particolare struttura cristallina) con contenuto in alluminio superiore al 10 per cento (e bassa porosità primaria, meno dello 0,5 per cento). Il processo di arenizzazione sembra favorito dalla porosità primaria e dalla fratturazione.

Sono dunque questi fattori (percentuale di quarzo, porosità primaria, grado di fratturazione, contenuto in fillosilicati e idrossidi di ferro) a condizionare le morfologie ipogee e a portare alla formazione di estesi e ramificati sistemi di gallerie suborizzontali. Il collasso di queste cavità genera doline di crollo e altre depressioni che caratterizzano la superficie dei tepui. È chiaro quindi che la dissoluzione sotterranea sia determinante nel processo di evoluzione morfologica dei tepui.

Batteri, minerali e concrezioni

Queste montagne sono già di per sé luoghi estremamente remoti e poco studiati, ma le grotte che vi si aprono sono talmente isolate che al loro interno è ancora piuttosto facile trovare nuovi minerali. Come quello scoperto nel 2012 sul tepui Chimanta durante l'esplorazione della grotta Akopan-Dal Cin (dedicata a Francesco Dal Cin, un altro socio La Venta scomparso). Il minerale in questione è un solfato-fosfato di alluminio che si trova sotto forma di cristalli di dimensioni intorno a un decimo di millimetro, di colore trasparente o leggermente rosato, a formare una sabbia molto fine di consistenza e luminosità vitrea. La struttura mostra alcune simi-

Perché esplorare le grotte

La speleologia si è affermata come disciplina a sé solo sul finire dell'Ottocento, sotto l'impulso di esploratori soprattutto europei, tra i quali il francese Édouard-Alfred Martel, che ne è ritenuto il padre. Ma evidentemente la frequentazione umana delle grotte comincia ben prima: trascurando l'uso abitativo o culturale delle grotte, la prima testimonianza di un'esplorazione sotterranea risale all'853 a.C., anno della prima visita documentata delle sorgenti del fiume Tigri, nel Vicino Oriente, da parte del re assiro Shalmaneser III. Di quell'esperienza ci restano una memoria scritta e uno schizzo della grotta.

Gli speleologi moderni fanno esattamente questo: esplorano il mondo sotterraneo, lo descrivono e ne disegnano le mappe. E lo fanno nell'unico modo possibile: andandoci. Le moderne tecnologie satellitari permettono di fotografare e cartografare in dettaglio la superficie terrestre, ma non di rivelare da remoto la presenza di grotte. Vale a dire: l'esistenza di cavità sotterranee

si può dedurre dalle prove che esse proiettano in superficie (lo si fa anche per i pianeti lontani, analizzando depressioni e collassi), però per descriverle e disegnarne le mappe occorre entrarci. La speleologia è quindi l'ultima frontiera dell'esplorazione geografica sulla Terra.

Mediamente, questa attività è praticata nelle aree in cui abbondano rocce carsificabili, innanzitutto quelle carbonatiche, che occupano un quinto delle terre emerse, e in un secolo di speleologia è stato esplorato un totale di circa 30.000 chilometri di cavità. La grotta più lunga al mondo è la Mammoth Cave, in Kentucky, negli Stati Uniti: oltre 600 chilometri. La più profonda è la Krubera Voronya, nel Caucaso: -2199 metri. Si stima che sulla Terra, o meglio sotto la sua superficie, esistano 10 milioni di chilometri di gallerie e ambienti sotterranei. Immensamente più di quanto sia umanamente esplorabile.

E questo senza tenere conto delle grotte che possono formarsi in altre rocce o materiali, per esem-

pio i tunnel di lava (diffusi sui vulcani a lave basaltiche/basiche, molto fluide) ipotizzati anche sulla superficie di Marte, o le cavità endoglaciali, che si formano per fusione all'interno dei ghiacciai.

In qualità di collettori idrici, le grotte sono grandi serbatoi d'acqua. La loro conoscenza aiuta a comprendere la circolazione idrica sotterranea e a ubicare le riserve terrestri di acqua potabile.

Ma questa è solo la parte più evidente dell'interesse scientifico delle grotte, che permettono di entrare direttamente nelle profondità delle montagne, osservando da vicino strutture geologiche altrimenti deducibili solo osservandone la proiezione in superficie. Le grotte sono inoltre interessanti laboratori biologici: le forme di vita presenti si sono evolute quasi sempre in isolamento dall'ambiente esterno. Hanno avuto cioè la possibilità di evolvere in modo autonomo, secondo il modello della speciazione allopatrica, tipica delle isole. Il modello è quello teorizzato da Charles Darwin per i fringuelli delle isole Galápagos.

larità con quella della sanjuanite (un solfato-fosfato di alluminio scoperto alla fine degli anni sessanta nella provincia di San Juan, in Argentina), sovente associato insieme a gesso, alunite, quarzo e microsfele di silice amorfa. Il nuovo minerale è stato chiamato rossiantonite, in onore del petrografo Antonio Rossi, professore all'Università di Modena e Reggio Emilia, scomparso nel 2011, e tra i padri della speleologia scientifica italiana.

Rossiantonite e sanjuanite si trovano spesso in associazione con gli speleotemi di origine biogenica, cioè concrezioni formatesi con il contributo di processi biologici. La nucleazione di questi due composti potrebbe essere favorita dall'attività di microrganismi come batteri del genere *Janthinobacterium*, responsabili anche della colorazione violacea di molti laghi della grotta attraverso la produzione di sostanze particolari come la violaceina.

Lo studio delle concrezioni sta dando risultati interessanti. Nelle grotte classiche in rocce carbonatiche, stalattiti, stalagmiti e colate sono prodotte dalla precipitazione del carbonato disciolto in acqua. È un processo noto, che può essere condizionato anche dalla presenza di acidi (per esempio acido carbonico) eventualmente prodotti da microrganismi.

Pur mancando i carbonati, nelle grotte dei tepui c'è abbondanza di concrezioni. Ricercatori cechi, slovacchi e venezuelani hanno individuato formazioni sedimentarie di tipo stromatolitico, ovvero concrezioni spugnose dovute all'attività di microrganismi, composte di silice. Nel caso dei tepui sono state prodotte perlopiù da cianobatteri, probabilmente in associazione con funghi e talvolta con organismi vegetali che favoriscono la precipitazione di minerali. Studi effettuati da Northern Kentucky University, Universidad Simón Bolívar di Caracas e California Institute of Technology hanno ipotizzato che l'attività microbica contribuisca ad aumentare il pH sulle pareti delle grotte. Sul Cerro Roraima sono stati isolati batteri in grado di fissare azoto e accumulare ammoniaca, generando quindi un ambiente basico favorevole

alla dissoluzione della silice e quindi all'arenizzazione della quarzite. L'attività dei batteri sarebbe dunque direttamente responsabile del modellamento del paesaggio, in superficie ma soprattutto nel sottosuolo.

All'origine della vita

Come abbiamo visto, le grotte in quarzite sono interessanti laboratori biologici. Qui isolamento e longevità permettono a singoli processi di agire non perturbati da fattori esterni. I ricercatori possono osservare senza rumore di fondo processi che altrove sono più difficilmente isolabili.

Lo studio della biologia di questi ambienti sotterranei può fornire nuovi elementi utili alla comprensione delle prime fasi della vita sulla Terra. Questo perché le quarzite, non contenendo carbonato di calcio, non sono una fonte di carbonio, elemento indispensabile per la vita. Eppure sui tepui la vita c'è. In superficie l'assenza di carbonati ha favorito l'evoluzione di specie vegetali (per esempio le piante carnivore del genere *Heliophora*) capaci di procurarsi il carbonio da fonti animali. Ma sottoterra, in assenza di luce, le cose sono più complesse: la geochimica delle grotte in quarzite è legata all'ossido di silicio, una molecola che non può essere usata dalla vita per produrre energia.

I torrenti di queste grotte trasportano acidi organici provenienti dall'esterno, sicché hanno mediamente un pH basso, che rallenta la dissoluzione della silice. La situazione cambia però nelle zone di ristagno: qui gli acidi (soprattutto il glicerolo) vengono consumati dai batteri. Ne risulta un aumento del pH e una maggior dissoluzione della silice.

La silice disciolta è sfruttata dai batteri per costruire stromatoliti che possono raggiungere anche alcuni metri di lunghezza. L'idea dei ricercatori è che queste stromatoliti farebbero da trappole per catturare il ferro disciolto nell'acqua che percola nelle fessure, ma soprattutto per assorbire l'umidità dell'aria, contenente solfati



Nidi al riparo. Negli ambienti più riparati e non percorsi dall'acqua si trovano numerosi nidi di uccelli guácharos (*Steatornis caripensis*).

di origine atmosferica. Sarebbero proprio questi solfati ad alimentare i batteri, con processi analoghi a quelli ipotizzati per i batteri che popolarono la Terra primordiale. Il che, come dicevamo, fa delle grotte in quarzite eccezionali laboratori per lo studio delle prime fasi della vita.

Il futuro del progetto

Una spedizione del marzo 2016 sull'Auyantepui ha topografato le regioni più importanti della grotta Imawari Yeuta con la tecnica del laser scanner. Questo permetterà di ricavare un modello 3D della cavità. Inoltre sono stati effettuati nuovi campionamenti in collaborazione con il microbiologo saudita Hosam Zowawi, dell'Università del Queensland a Brisbane, in Australia. Zowawi ha ricevuto il Rolex Award per le sue ricerche sulla resistenza dei batteri agli antibiotici, lavoro che nell'ambiente ipogeo dei tepui potrebbe compiere ulteriori passi avanti. Nel corso delle ultime spedizioni è stato anche effettuato un primo sopralluogo sul Sarisariñama, un tepui che si trova circa 200 chilometri a ovest dell'Auyan.

Nei prossimi anni sono previste nuove missioni, e si pensa di raggiungere il Cerro Marahuaca, alto 2800 metri e parte di un plateau molto più ampio chiamato Cerro Duida. Si trova nello Stato venezuelano di Amazonas, 600 chilometri a ovest rispetto all'Auyantepui. Verranno raccolti dati anche sulle quarziti del Brasile centrale, dove sono ben noti grandi sistemi sotterranei.

Le fasi recenti del Progetto Tepui sono coordinate dal geologo Francesco Sauro, che per questo è stato insignito del prestigioso Rolex Award for Enterprise. Le ricerche sono svolte col patrocinio del Governo dello Stato di Bolívar, in Venezuela, della Società speleologica italiana, della Commissione centrale per la speleologia del Club alpino italiano e della Fondazione Dolomiti UNESCO. La parte scientifica viene svolta in collaborazione con l'Istituto italiano di speleologia dell'Università di Bologna e col Dipartimento di scienze della Terra dell'Università di Firenze. Le esplora-

zioni in Venezuela sono organizzate insieme all'associazione Theraphosa, di Puerto Ordaz. Negli ultimi anni le ricerche si sono estese all'Amazzonia brasiliana, in collaborazione con il gruppo Bambui de Pesquisas Espeleológicas di Belo Horizonte.

Importante è il sostegno delle comunità locali: come i Pemones, che vivono alla base del tepui Auyan, nel villaggio di Kavak presso Kamarata; e gli Yekuanas del villaggio di Kanarakuni, sotto il Sarisariñama. Le esplorazioni sono organizzate tenendo conto delle loro indicazioni e prestando attenzione alle leggende, spesso ricche di dettagli sulla geografia di questi luoghi inesplorati.

Oltre ai normali protocolli di sicurezza, le spedizioni si attengono anche a severe regole appositamente elaborate dal gruppo La Venta per evitare danni ambientali. Per esempio, sia in esterno sia in grotta vengono individuati percorsi ben precisi, marcati con nastri provvisori, evitando così di calpestare inutilmente aree della grotta oltre a quelle necessarie per la progressione. Tutti i rifiuti, compresi quelli fisiologici, sono riportati a valle: questo per limitare il più possibile l'introduzione di elementi di disturbo in ambienti rimasti imperturbati per milioni di anni, e che possono essere preziosi laboratori per lo studio di processi minerali e biologici. E quindi per la scoperta di ulteriori tessere del complesso mosaico della vita, sulla Terra e su altri pianeti. ■

PER APPROFONDIRE

Nella casa degli dei. Le grotte dell'Auyantepui. Sauro F. e altri, in «Speleologia» n. 71, dicembre 2014. <http://www.speleologiassi.it/71-sommario>.

Structural and Lithological Guidance on Speleogenesis in Quartz-Sandstone: Evidence of the Arenisation Process. Sauro F., in «Geomorphology», Vol. 226, pp. 106-123, 2014. doi: 10.1016/j.geomorph.2014.07.033.

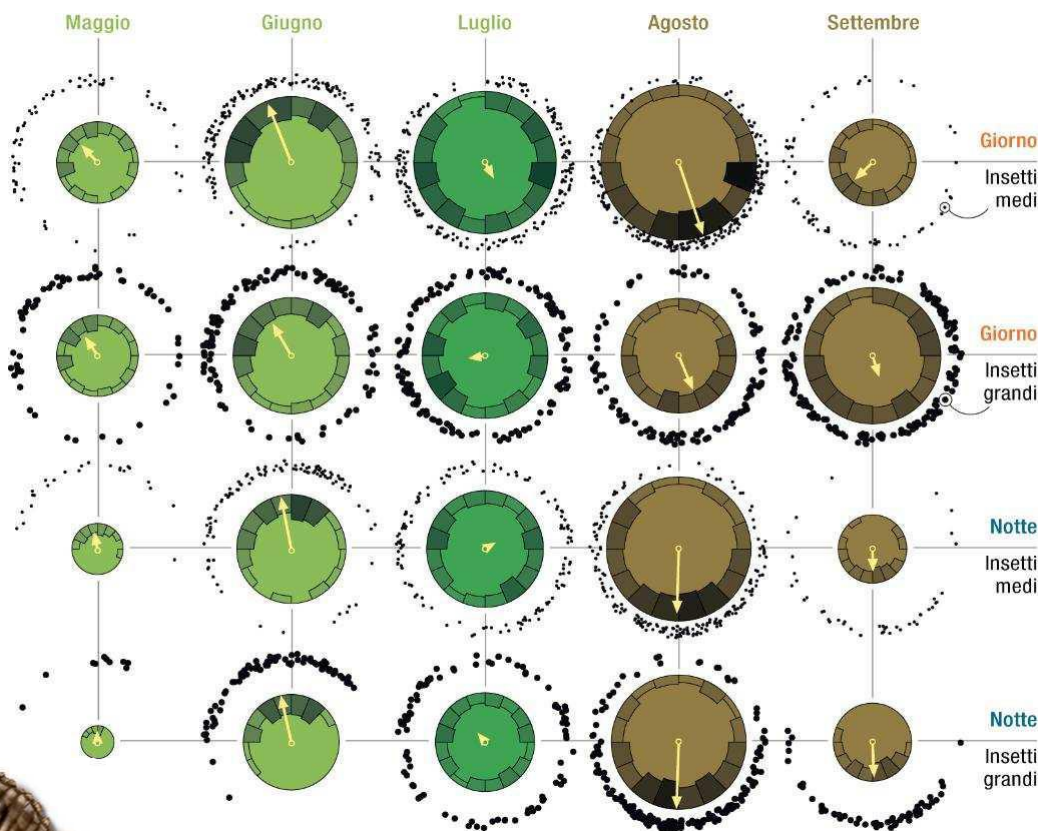
Source and Genesis of Sulphate and Phosphate-Sulphate Minerals in a Quartz-Sandstone Cave Environment. Sauro F. e altri, in «Sedimentology», Vol. 61, pp. 1433-1451, 21 marzo 2014. doi: 10.1111/sed.12103.

Il sito web del gruppo La Venta: www.laventa.it.



Schemi di migrazioni

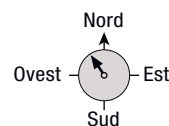
Sulla Gran Bretagna meridionale, la maggior parte degli spostamenti degli insetti avviene a fine maggio e a giugno verso nord-ovest, e a fine agosto e a settembre verso sud-est (*freccia*). Molti insetti non vivono al lungo e lottano per sopravvivere al freddo, così per completare la migrazione annuale potrebbero essere necessarie fino a sei generazioni per una famiglia, volando in direzioni leggermente differenti da un'area di riproduzione alla successiva.



Come leggere questo grafico

Oltre il 70 per cento delle migrazioni avviene durante il giorno (*prime due file*); mentre la notte sono di meno (*ultime due file*).

Direzione della migrazione
Le frecce indicano la direzione del volo. Una freccia più lunga indica più insetti su quel percorso.



Sagome più scure e più grandi in un cerchio mostrano le direzioni di viaggio più seguite.



Numeri relativi di insetti
Cerchi più grandi indicano più insetti in volo. I punti neri indicano momenti in cui molti insetti stanno volando in una direzione.

Le migrazioni degli insetti

Dati sorprendenti mostrano che ogni anno migrano molte specie

Ci sono farfalle che migrano per migliaia di chilometri all'anno, eppure gli scienziati hanno ipotizzato che la maggior parte degli altri insetti viva sostanzialmente nello stesso posto. Ma non è così. Uno studio decennale ha trovato che ogni anno oltre 3300 miliardi di insetti migrano sopra la Gran Bretagna meridionale, specialmente in primavera e autunno (*grafico sotto*). «Si pensava che gli insetti fossero passivi e che venissero spostati accidentalmente», dice il ricercatore Jason W. Chapman dell'Università di Exeter

in Inghilterra. «Non è affatto così. Gli insetti scelgono attivamente quando migrare e come sfruttare i venti, spesso muovendosi veloci su lunghe distanze, in direzioni vantaggiose» (*sopra*). Secondo lo scienziato, vanno in cerca di vegetazione più verde e condizioni meteo migliori per accoppiarsi. Studi iniziali in Stati Uniti, India e Cina mostrano andamenti simili. La migrazione degli insetti, dice Chapman, «inizia ad apparire universale».

Mark Fischetti

Viaggio stagionale

I radar che guardano verso il cielo da terra mostrano che, in media, 3200 tonnellate di insetti all'anno viaggiano sopra le nostre teste a una quota superiore ai 150 metri circa (quindi senza tener conto dei movimenti casuali vicino al suolo). In anni con tempo più rigido, più insetti del solito si muovono a sud in autunno e a nord in primavera.





di Paolo Attivissimo

Giornalista informatico e studioso della disinformazione nei media

L'ozono e il presidente

La lezione del buco dell'ozono sembra non aver insegnato molto ai decisori politici

Antartide, 1982: il geofisico britannico Joseph Farman sospetta un errore sistematico del suo vecchio spettrofotometro, usato per 25 anni allo scopo di raccogliere diligentemente dati sull'atmosfera del continente ghiacciato, e così lo fa sostituire. Ma lo strumento nuovo produce risultati ancora più sorprendenti, anche se i controlli non rilevano difetti o errori di metodo: i dati sono reali.

Dopo decenni di variazioni modeste, al punto che i suoi superiori volevano tagliargli i fondi, Farman conclude con stupore che lo strato di ozono nell'alta atmosfera antartica si è quasi dimezzato in pochi anni. Qualcosa sta distruggendo rapidamente questo filtro protettivo naturale, senza cui i raggi ultravioletti del Sole arriverebbero al suolo, causando tumori alla pelle e lesioni della vista negli esseri umani e negli altri animali oltre che danni alle coltivazioni e agli ecosistemi marini. Se questa distruzione al Polo Sud (il cosiddetto «buco dell'ozono») si estendesse verso zone densamente popolate, le conseguenze sarebbero catastrofiche.

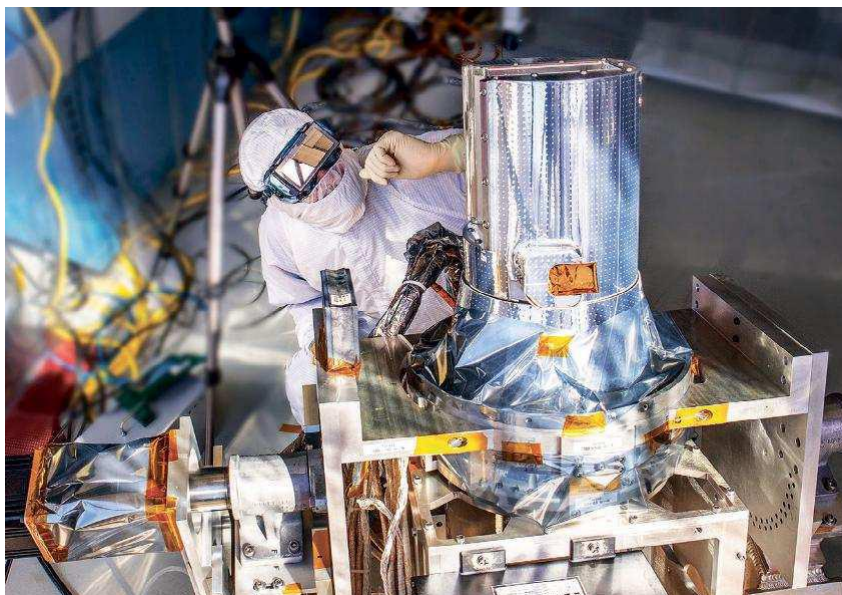
Paradossalmente, anche i satelliti della NASA dedicati alla stessa ricerca hanno rilevato questo crollo stagionale, ma sono programmati per ignorare variazioni così estreme e liquidarle come errori strumentali. Riesaminando i loro dati grezzi, però, i ricercatori dell'ente spaziale confermano le osservazioni di Farman. Insieme ai britannici Brian Gardiner e Jonathan Shanklin, a maggio 1985 Farman pubblica su «Nature» l'articolo scientifico che porterà appena due anni dopo alla ratifica mondiale del Protocollo di Montreal, che bandisce le sostanze industriali a base di cloro risultate colpevoli della distruzione dell'ozono e ampiamente usate come propellenti per le bombolette spray, come refrigeranti nei frigoriferi e come soppressori d'incendi negli estintori.

Inizialmente la protesta dell'industria chimica è forte e preannuncia costi di sostituzione insostenibili, e non mancano i negazionisti del buco dell'ozono, ma Farman ha dalla sua il primo ministro britannico Margaret Thatcher – laureata in chimica all'Università di Oxford – i dati satellitari che indicano già cali significativi dell'ozono anche sopra America, Europa, Asia, Australia e gran parte dell'Africa, e un consenso scientifico schiacciante. Così la produzione mondiale di sostanze dannose per l'ozono cessa rapidamente e vengono sviluppati prodotti alternativi. Il recupero

naturale dello strato di ozono, però, non è altrettanto celere: i suoi primi segni risalgono solo al 2014 e le previsioni più recenti indicano un ritorno completo alla normalità non prima del 2065.

Senza la ricerca di base, senza la paziente e continua raccolta di dati sull'ambiente a prima vista inutili e la cocciutaggine di un ricercatore attento, oggi non saremmo qui a celebrare il trentennale del Protocollo di Montreal e a ricordare questa vicenda del «buco dell'ozono» soltanto come una rara lezione a lieto fine di ecologia.

Il monitoraggio dell'ozono è proseguito finora grazie a sensori orbitanti della NASA, il più recente dei quali (SAGE III) è sta-



Un occhio per il buco. Un ingegnere al lavoro su SAGE III, il sensore orbitante della NASA destinato al monitoraggio del buco dell'ozono.

to installato sulla Stazione spaziale internazionale a marzo di quest'anno. Ma è uno strumento costruito negli anni novanta e non ci sono piani concreti per un suo successore.

Soprattutto, la lezione di trent'anni fa non è stata imparata: la presidenza Trump ha dato fortissimi segnali di voler togliere fondi e strumenti normativi all'Environmental Protection Agency, l'ente statunitense per la protezione dell'ambiente, e all'intera ricerca sul clima, scivolando verso il negazionismo sul riscaldamento globale: un altro problema ecologico su cui c'è consenso scientifico e ci sono dati inequivocabili ma sembrano mancare stavolta leader capaci di affrontare questioni scientifiche usando la scienza invece degli slogan su Twitter.



Un allarme prematuro

Non sono ancora state trovate prove di un legame tra parabeni e tumori al seno

“**I** parabeni penetrano la pelle!». L'allarme mi compare sulla bacheca di Facebook condiviso da un mio contatto e da altre 1392 persone. «Attenzione ai prodotti che usate – continua il messaggio – nel 99 per cento dei tessuti colpiti da tumore al seno sono stati riscontrati parabeni!». Segue la lista delle marche e dei prodotti da evitare: shampoo, deodoranti, dentifrici, saponi, creme, praticamente tutto. Nel frattempo, sugli scaffali dei supermercati iniziano a spopolare i prodotti «paraben-free» alimentando, ancora di più, la paura per queste sostanze. Ma è vero che fanno male?

Chimicamente parlando, i parabeni sono i derivati dell'acido paraidrossibenzoico. Ne esistono di vari tipi che agiscono su microrganismi diversi, ma la sostanza è la stessa: servono a prolungare la vita dei prodotti e, alla fine, a proteggerci dalle contaminazioni. Per decenni sono stati aggiunti ai cosmetici senza che nessuno si preoccupasse, anzi, proprio la loro presenza era una garanzia di sicurezza del prodotto.

Ma una decina di anni fa, le cose per loro hanno iniziato a mettersi male. Siamo infatti nel 2004 quando il «Journal of Applied Toxicology» pubblica un articolo dal titolo *Concentrations of parabens in human breast tumours* (Concentrazioni di parabeni nei tumori umani della mammella) a firma di ricercatori dell'Università di Reading guidati da Philippa Darbre. I parabeni hanno un'azione che mima quella degli estrogeni e, poiché proprio gli estrogeni sono coinvolti nella genesi di alcuni tipi di cancro al seno, la rilevazione dei parabeni nelle cellule tumorali delle 20 pazienti esaminate ha fatto accendere molti campanelli d'allarme. Lo studio, però, aveva molti limiti, come rilevato fin da subito dalla comunità scientifica. La stessa Darbre dichiarava in quei giorni al «New Scientist» che «lo studio non permette di concludere che i parabeni provocano questi tumori». Tutto a posto, quindi? In realtà no, perché a quella frase ne è seguita un'altra che ha segnato la fine commerciale dei parabeni: «Ma possono sicuramente essere associati all'incremento dei casi di tumore alla mammella».

La storia delle pseudoscienze è lastricata di «ma». C'è sempre uno scienziato che sulle riviste scientifiche si comporta bene, misura le parole, non si sposta mai dal perimetro dei fatti, *ma* poi si lascia andare sui giornali e libera i suoi pensieri non supportati da fatti. Quello che rimane della dichiarazione di Darbre non è la pri-

ma parte in cui afferma che non può concludere niente, *ma* la seconda, quella in cui una conclusione la tira fuori, anche se quella conclusione non è niente di più che un'opinione. Un'opinione rafforzata dalla confessione che lei i deodoranti ha smesso di usarli da anni, «almeno finché non dimostreranno che sono sicuri».

Nel frattempo, altri gruppi hanno contribuito a chiarire il quadro. Nel 2005, Robert Golden dell'Università del Wisconsin ha confrontato l'attività estrogenica dei parabeni con quella dell'estrogeno per eccellenza, l'estradiolo, prodotto «naturale» delle ovaie, concludendo che «i parabeni hanno un'attività di molti ordini di grandezza inferiore a quella degli estrogeni», inferiore an-



La presenza dei parabeni nei prodotti per la cura del corpo e del viso serve a prolungarne la durata, proteggendo dalle contaminazioni.

che a quella dei fitoestrogeni che si assumono mangiando, per esempio, soia. Tre anni dopo, un gruppo dell'Università di Nizza ha esaminato tutte le ricerche pubblicate sul tema concludendo che «non è stata pubblicata nessuna prova a supporto dell'ipotesi che i parabeni siano collegati ai tumori alla mammella». Tant'è che Food and Drug Administration statunitense ed enti regolatori dell'Unione Europea li dichiarano sicuri e ne ammettono l'uso.

Sono passati 13 anni e niente è cambiato. Darbre continua a cercare i parabeni nei tessuti tumorali, ma senza aggiungere elementi utili a supporto dell'ipotesi che siano la causa dei tumori. «Ci vuole tempo», dice Darbre. Ci dovrebbe voler tempo anche per lanciare allarmi, però.



di Dario Bressanini

chimico, divulgatore interessato all'esplorazione scientifica del cibo.
Autore di *Pane e Bugie*, *OGM tra leggende e realtà* e *Le bugie nel carrello*.

La tripletta del caramello

Questo elemento importante per i dolci può essere preparato in tre modi diversi

Fra tutte le reazioni chimiche che avvengono in cucina probabilmente quella più affascinante è la caramellizzazione. Mettete un paio di cucchiaini di zucchero in un pentolino e scaldate: a circa 160 °C lo zucchero comincia a liquefarsi. Le sue molecole cominciano a rompersi e i frammenti reagiscono tra loro formando una serie di composti bruni aromatici: lo zucchero sta caramellizzando, cioè formando, appunto, il caramello. A seconda del grado di caramellizzazione si può ottenere un composto dal colore biondo chiaro sino a uno rosso cupo, bruno oppure, se è stato scaldato troppo e ha iniziato a degradarsi, addirittura nerastro.

La cosa affascinante di questa reazione è che partendo da un solo tipo di molecola – il saccarosio in questo caso ma il fenomeno avviene anche con altri zuccheri come glucosio o fruttosio – si formano migliaia di composti diversi la cui precisa struttura è ancora in parte sconosciuta ai chimici. Solo molecole che caratterizzano il meraviglioso aroma di caramello sono state identificate.

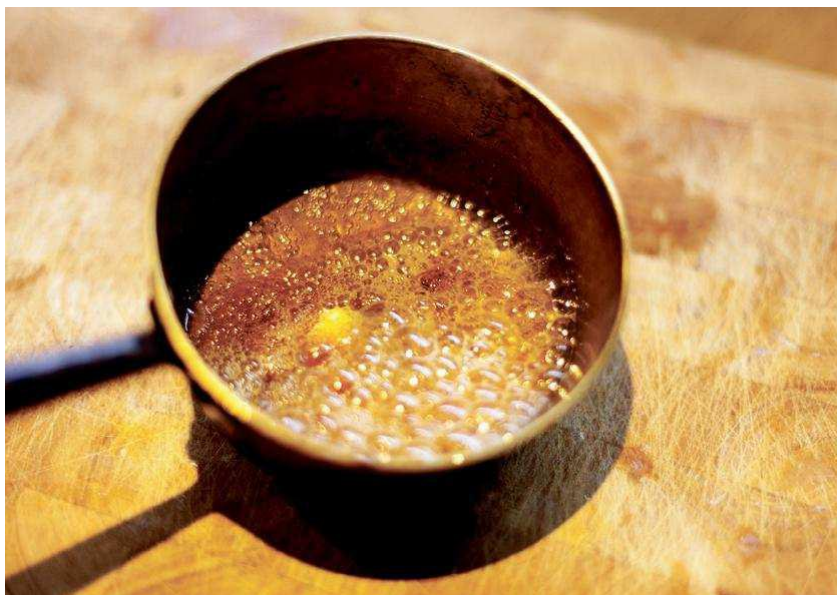
Il diacetile per esempio è il principale responsabile delle note «burrose». Nel 1967 il chimico giapponese Kitaoka scoprì che durante la caramellizzazione si formano tre grosse famiglie di molecole ma ancora oggi, cinquant'anni dopo, la loro caratterizzazione completa sfugge per via dell'enorme numero di molecole simili che si formano. Nel 2012 Agnieszka Golon e Nikolai Kuhnert, due chimici tedeschi, usando le tecniche più avanzate della chimica analitica, hanno fatto un passo in avanti verso l'identificazione di molte delle molecole prodotte. Uno dei misteri che ancora avvolge il caramello è l'identità delle sostanze responsabili del colore marrone. Golon e Kuhnert hanno scoperto che il caratteristico colore è dovuto ad almeno tre gruppi di molecole che assorbendo la luce a frequenze diverse donano la colorazione marrone. In attesa che le tecniche ci permettano di risolvere del tutto il mistero della composizione del caramello, possiamo prepararne un po' da usare per una salsa o un croccante.

Attenzione: lavorare con lo zucchero fuso può essere pericoloso. Indossate sempre degli occhiali di protezione e che non vi venga in mente di leccare il cucchiaino rovente che avete appena usato per mescolare il caramello.

Ci sono tre metodi per preparare il caramello: asciutto, bagnato e microonde. Con il metodo asciutto lo zucchero è messo in un pentolino senza niente altro. Mescolate con il fuoco al minimo

e una spatola di silicone per miscelare lo zucchero già fuso con quello ancora solido, evitando che bruci nelle zone più calde.

Con il metodo bagnato si aggiunge allo zucchero un po' d'acqua in modo che abbia la consistenza della sabbia bagnata. La quantità di acqua non è importante: serve solo a sciogliere inizialmente parte dello zucchero per scaldarlo senza rischi. Scaldate a fuoco medio-alto e quando l'acqua inizia a bollire non muovete o mescolate la miscela: potreste mandare dei piccoli spruzzi sulle pareti del pentolino che rischierebbero di far cristallizzare immediatamente la soluzione. Quando l'acqua è quasi completamente evaporata lo zucchero fuso comincia a caramellizzare. È meglio



Ricordate gli occhiali. Lavorare con lo zucchero fuso può essere pericoloso: durante la preparazione del caramello in pentolini bisogna sempre indossare occhiali di protezione.

non immergere cucchiaini o altri utensili nello zucchero fuso ma roteare gentilmente il pentolino per mescolare.

Il metodo al microonde è in assoluto il più semplice e sicuro. Mettete 100 grammi di zucchero, 20 grammi di sciroppo di glucosio e 10 grammi di acqua in un recipiente di Pyrex. Lo sciroppo di glucosio non farà cristallizzare prematuramente lo zucchero fuso e farà assorbire più velocemente le microonde. Riscaldare a massima potenza, 3-6 minuti a seconda del vostro apparecchio, fino a quando non avrà assunto un colore ambrato intenso. Tiratelo fuori e lasciate riposare per qualche minuto: continuerà a cuocere e a diventare più scuro. Aggiungete acqua finché è caldo per ottenere la consistenza desiderata della salsa.

Quasi come al 221b di Baker Street

L'ingresso di Alice era stato silenzioso come al solito; un'amante dei gatti sa bene come muoversi con passi felpati, che ce ne sia bisogno o meno. Di solito, però, l'assenza di rumore dell'arrivo della dottoressa Riddle passa inane come una goccia d'acqua dolce nel vasto oceano salato, tanto è usuale il fracasso regolarmente prodotto dai suoi umani coinquilini. Stavolta, invece, nulla: roba che si sarebbe potuto sentire perfino il rumore del leggero caracollo di benvenuto di Gaetanagnesi, se solo ci fosse stato. E invece niente di niente, appunto: neppure la gatta viene a salutarla. Con un briciolo di preoccupazione, Alice allunga collo e sguardo verso il soggiorno, e rapidamente si tranquillizza.

«Deduco che questa sera Doc abbia da fare.»

Rudy si volge verso l'ingresso, e sorride: «E da che cosa nasce questa tua deduzione, Treccia?»

«*Alimentare*, mio caro Watson. C'è un vassoio di paste sul tavolo ancora intonso; Gaetanagnesi sta facendo l'imitazione del sorriso del Gatto del Cheshire (con gatto visibile, una volta tanto), e le birre sul tavolo sono ancora tutte chiuse, tranne la tua. Ergo, Doc non è in casa.»

«Brillante deduzione, Sherlock. Per estenderla e ricostruire completamente gli avvenimenti, non ti resta che scoprire la causa (nonché il meritevole architetto) di questa rasserenante assenza, che mi auguro perduri per un ragguardevole numero di ore.»

«Oh, l'architetto non puoi essere che tu... e questo non perché la micia non possieda il giusto grado di intelligenza e abilità nel cacciare fuori di casa chicchessia; più semplicemente, la sua filosofia di vita può riassumersi nel motto "più umani presenti in casa, più possibilità di piatire dei croccantini", e ci si attiene scrupolosamente. Ma, soprattutto, tu non sei fisicamente in grado di associare l'aggettivo "meritevole" ad altri diversi da te, ergo...»

«Ergo, non posso che complimentarmi, anche se non credo proprio che tu avessi intenzione di fare complimenti a me, con le tue osservazioni», riconosce Rudy: «Ora non resta che dedurre la causa. Ma temo sia impossibile, quindi...»

«Ecco sì, tagliamo corto, che è meglio... non mi piace mettermi a dedurre le cose deducibili, figuriamoci quelle che non lo sono. Oddio, è del tutto evidente che a Doc piace la brunetta e che vuole farsi bello con lei, ma non so se ci riuscirà, contro un marcantonio elegante come il tizio che l'accompagnava. Specialmente se invece di farle una corte tradizionale a base di fiori e cioccolatini si prepara a tormentarla con giochi numerici o di scacchiera...»

Gli occhi di Rudy si spalancano oltre misura; «Ehi, va bene che prima ti ho chiamata Sherlock, ma insomma, stavo scherzando... Mi vuoi spiegare come diavolo hai fatto a...»

«Non ti sei mai chiesto perché i romanzi di Conan Doyle hanno un gran successo tra i maschietti e meno tra le femminucce? Te lo dico io: perché quando all'inizio di ogni avventura sciorina vita morte e miracoli di chi gli capita di fronte sulla base di pochi indizi presi dall'aspetto del malcapitato, Holmes fa qualcosa che è quasi impossibile per il maschio medio, ma che è invece del tutto naturale per gli occhi femminili. Sul divano ci sono capelli lun-



ghi e scuri, che nessuno di noi ha; e che non siano di un maschietto capellone si deduce dalle orme dei tacchi a spillo ancora visibili sulla moquette. Dalla deformazione dei cuscini del divano si capisce che Doc le era seduto vicino – troppo vicino – cosa che conferma che le fanciulla gli piace, oltre all'indizio principale dato dalla puzza della sua fetente acqua di colonia che ancora si sente nei pressi della porta del bagno, e che per nostra fortuna lui usa solo in occasioni "speciali". Non ci sono tracce di una terza persona sul divano, ma su questo stipite si vede benissimo un residuo di gel per capelli, all'altezza di quasi due metri da terra, e un palmo più sotto è rimasta attaccata una fibra di un misto di lana e se-



Doc vuole conquistare una donna con un gioco ma non ha fatto i conti con il marcantonio che la accompagna

IL PROBLEMA DI MARZO

Ad Alice e Doc viene detto in segreto un numero a testa; non conoscono il numero dell'altro, ma entrambi sanno che i due numeri comunicati sono consecutivi. Chi scopre quale sia la coppia di numeri può annunciarla subito dopo il rintocco di un orologio contaminuti. Il gioco si basa sui concetti di «conoscenza mutua» e «conoscenza comune»: la prima, più debole, indica solo che una nozione è posseduta da entrambi i giocatori, mentre la seconda, più forte, porta l'informazione aggiuntiva che entrambi i giocatori «sanno che anche l'altro sa». È evidente che un giocatore che avesse il numero 20 sa che l'altro può avere solo 19 o 21; può pertanto escludere i numeri da 1 a 18 come «impossibili»: questa è peraltro conoscenza mutua, pro-

mossa a «conoscenza comune» dai rintocchi dei primi minuti dell'orologio. Ma l'insieme dei «numeri impossibili» è diverso: il suo compagno, qualora avesse 19, troverebbe significativo il silenzio che seguirebbe al 17° rintocco, mentre se avesse il numero 21 ciò non accadrebbe. Per esempio, se a Doc venisse detto il numero «2», ad Alice potrebbe essere stato detto «1» o «3»; ma se il valore di Alice fosse stato «1», già al primo rintocco avrebbe dato la risposta: se è stata zitta, significa che il numero di Alice è «3», e Doc potrà dirlo al secondo rintocco. Iterando, si vede che chi riceve il numero più basso della coppia (n) conoscerà entrambi i numeri al momento dell'($n-1$)esimo rintocco, visto che l'altro giocatore non ha parlato.



ta che da sola costa quanto un caffè al bar, e non voglio immaginare il prezzo dell'abito completo. Il marcantonio sarà rimasto qui in piedi a godersi la scena, mentre il nostro povero amico certo si arrabattava con foglietti e scacchiere, come denuncia il fatto che le nostre due da 8 x 8 e 10 x 10 caselle sono state riposte sul ripiano in maniera diversa da prima, come si vede dai quadrati di polvere (che, tra l'altro, denunciano anche che avete pulito da schifo il soggiorno ieri, quando era il vostro turno); e per quanto riguarda i foglietti quadrati con sopra i numeri, dannazione, ce ne sono ancora una mezza dozzina sul tappeto, non li vedi?»

Rudy tace.

«Saranno stati loro a portare le paste, e se Doc non le ha sfiorate, beh... inutile infierire oltre. Tu però che cosa c'entri, in tutto questo?»

Dopo aver sbattuto gli occhi un paio di volte, Rudy si distoglie dalla fissità. «Io? Oh. Niente... la brunetta chiedeva a Doc di aiutarla a battere il marcantonio a un gioco qualsiasi, purché di intelligenza; e di batterlo sempre, sia che fosse la prima a giocare o no. Il poveretto non sapeva che pesci pigliare, così l'ho preso da parte un attimo, gli ho detto di proporsi come arbitro e di farli sfidare a un gioco molto semplice: l'arbitro dispone come preferisce su tutte le caselle di una scacchiera dei foglietti con sopra scritti tutti i numeri interi necessari (100 nel caso della 10 x 10, 64 se si gioca con normale 8 x 8); il primo giocatore ne prende uno qualunque, l'altro giocatore ne prende un altro, rispettando la regola che deve comunque essere adiacente a una casella già «liberata».

«Eh...?»

«Eh niente: quando i fogliettini finiscono, ogni giocatore fa la somma dei numeri, e chi ha il totale più alto vince. Ho spiegato velocemente a Doc come far vincere sempre la ragazza, e poi sono scappati via di corsa tutti e tre; salto veloce in pizzeria e poi nel luogo deputato all'epica sfida, che non so quale sarà...»

«Povero Doc...», sospira Alice.

«Perché? Dici che non avrà capito bene le mie istruzioni?»

«No, non è per quello... io intravedo solo il metodo per far vincere chi gioca per primo, ma sono sicura che se gli hai spiegato una strategia valida anche per il secondo giocatore, lui riuscirà a ricordarla e a far vincere la sua ammalatrice. Ma...»

«Ma cosa? Non capisco...»

«Non capisci perché sei maschio, e quindi poco sveglio, anche se magari intelligentissimo. Secondo te, se una signorina è così incaponita a voler vincere anche barando delle stupide partite di uno stupido gioco contro un marcantonio, lo fa perché è interessata a confabulare con un povero arbitro, o perché vuole mostrare tutte le sue doti intellettive, oltre a quelle fisiche, al giovanotto che affronterà con guerresco e femminile cipiglio?»

«Ah... capisco.»

«Ecco. Sii pietoso, non toccare le paste: credo che fra un paio d'ore avremo bisogno di tutto il vassoio per tirargli un po' su il morale...»

Il lato umano del complottista

Menti sospettose

di Rob Brotherton

Bollati Boringhieri, Torino, 2017, pp. 360 (euro 26,00)

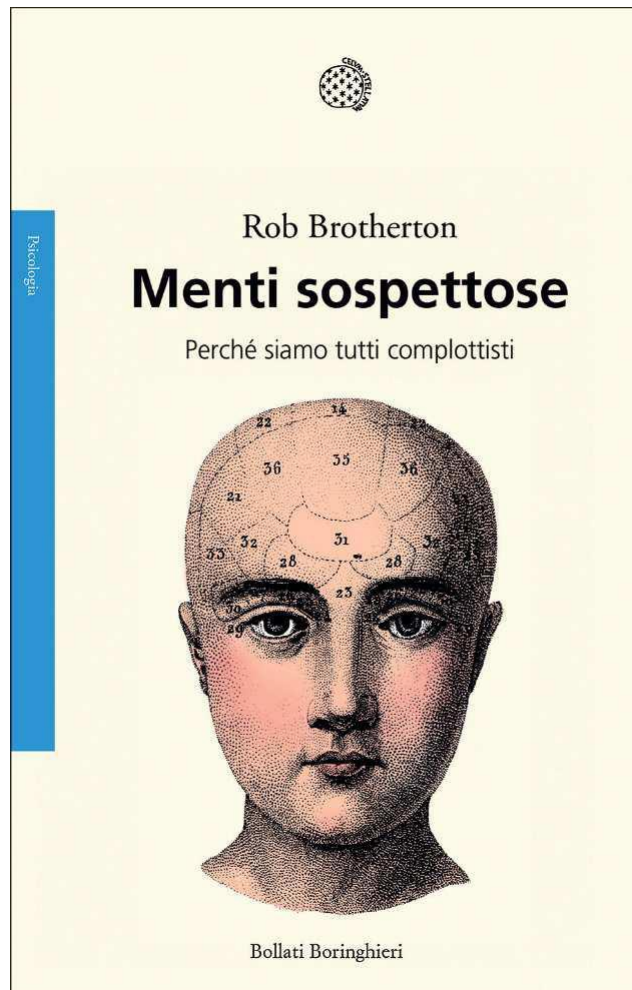
Stralunato e un po' scemo, con in testa un cappello di stagnola per difendersi da chissà quale pericolo elettromagnetico o dal prelievo forzoso dei pensieri. Lo stereotipo del complottista è più o meno questo. Ma è uno stereotipo sbagliato, colpevole di nascondere un fatto semplice e perfettamente dimostrabile: i complottisti siamo tutti noi, anche senza cappello di stagnola in testa e soprattutto che ci vogliamo credere o no. È la tesi di Rob Brotherton, psicologo della Columbia University, ben argomentata in un saggio assai godibile e che già dal titolo svela chi sia, secondo l'autore, il vero colpevole della nostra credulità: la mente umana.

Nel corso del suo saggio, Brotherton gioca a decostruire tutti i luoghi comuni sul credulone: luoghi comuni diffusi tra gli iperscientisti più sprezzanti ma anche tra gli psicologi che finora hanno affrontato il tema senza riuscire, nemmeno loro, a spogliarsi dei pregiudizi. Il primo appare in trasparenza dietro ogni fatto raccontato nel libro, ed è appunto quello per cui le teorie del complotto sarebbero aberrazioni psicologiche per emarginati di limitate capacità cognitive. Per iniziare a dimostrare che non è così, Brotherton comincia con il raccontare le più antiche leggende cospiratorie di cui si abbia traccia nella storia, molto più antiche dell'invenzione di Internet, alla faccia della presunta «era della disinformazione». La più famosa è Nerone che incendia Roma e che mentre la vede bruciare canta accompagnandosi con la cetra.

Ma se oggi le teorie del complotto hanno un carattere più esteso e globale è per via di due vecchie storie che hanno segnato un salto di qualità. La prima è quella degli Illuminati, setta nata a fine Settecento a cui, probabilmente non del tutto a torto, si attribuivano piani di distruzione della società e della religione, a partire dall'innescare della Rivoluzione francese. La seconda è quella dei *Protocolli dei Savi di Sion*, pubblicati all'inizio del secolo scorso e presto smascherati come plagio di pessima qualità ma su cui tanti hanno fondato il proprio antisemitismo, compreso Hitler. I *Protocolli* infatti contenevano i piani (ovviamente falsi) di dominazione del mondo da parte degli ebrei e hanno fornito un appoggio al vecchissimo mito del complotto ebraico mondiale, dando il pretesto per omicidi, torture, roghi, pogrom e infine per il piano di sterminio nazista.

Va detto anche, e Brotherton lo precisa bene, che nella maggior parte dei casi le teorie del complotto non spingono alla violenza: spingono semmai alla ricerca di un capro espiatorio. E questo, come nel caso della teoria per cui l'autismo e tante altre malattie sarebbero causate dai vaccini di Big Pharma, può fare danni in maniera più subdola, indiretta. O può distogliere l'attenzione dai problemi reali. Ma di nuovo, non si tratta di ignoranza. Si tratta dell'umana tendenza a credere a storie in cui da una parte ci sono i buoni e dall'altra i cattivi, ed è semplicemente così.

Il motivo è che tutti siamo predisposti a un pensiero più o meno paranoico di fronte a situazioni disordinate o inspiegabili, ed

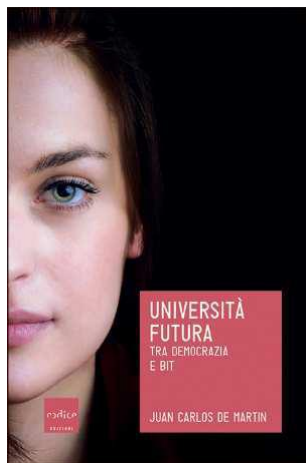


è probabilmente un tratto selezionato dalla nostra evoluzione per farci sopravvivere in un mondo pieno di incertezze. E tutti ci arroveliamo su domande senza risposta, tendiamo a non fidarci dell'apparenza, cerchiamo un'intenzionalità dietro a ogni fatto, siamo propensi a credere di avere nemici molto potenti, e in una disputa facciamo più volentieri il tifo per lo sfavorito tra tutti i contendenti. Non solo: cerchiamo le anomalie che confermano le nostre idee, ci sentiamo furbi quando uniamo i puntini di quello che crediamo essere un unico disegno, e comunque difficilmente ci lasciamo convincere del contrario. Insomma: «Siamo tutti un po' babbei alla ricerca di una buona coincidenza», scrive Brotherton.

Semmai tra di noi ci sono i più sensibili alle idee complottiste (e allora se credono a una, è molto probabile che credano anche ad altre) e quelli meno sensibili, ma non è vero che nella prima categoria ci siano gli sciocchi e nella seconda gli intelligentoni. Chi lo crede è un ingenuo esattamente quanto chi crede agli alieni o al cappello di stagnola.

Silvia Bencivelli

La crisi dell'università italiana e proposte per uscirne



Università futura

di Juan Carlos De Martin

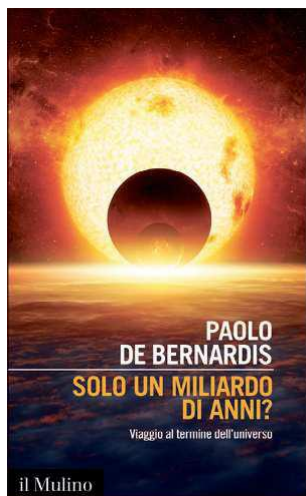
Codice Edizioni, Torino, 2017, pp. 236 (euro 16,00)

L'università è importante per le sfide che ci troviamo ad affrontare oggi? Parrebbe di sì, visto che nei paesi sviluppati si investe in quella direzione. In Italia invece no: l'università vive una crisi profonda, il cui principale aspetto è il sottofinanziamento. Anche la forma stessa dell'università, sempre più orientata a formare «lavoratori» invece di cittadini in grado di innovare e pensare criticamente, è stata snaturata da riforme pensate male e realizzate peggio. De Martin, che insegna al Politecnico di Torino, evidenzia come vi sia da più di un decennio un attacco strumentale nei confronti dell'idea di università come luogo di crescita personale e intellettuale, basato anche su notizie false.

Le soluzioni proposte ai presunti mali dell'università italiana sono state finora deficitarie. De Martin sottolinea come l'università sia un luogo centrale e necessario per affrontare le sfide del futuro (a livello globale: democrazia, ambiente, tecnologia, economia, geopolitica; libertà e prosperità per il nostro paese), proprio per il ruolo di formazione dei cittadini che va oltre la formazione «professionale». Per recuperare in Italia questo ruolo, si deve innanzitutto far aumentare il numero di laureati, permettendo però alle istituzioni di non dover competere tra loro per accaparrarsi gli studenti, e di poter seguire criteri di efficienza non importati da altri settori. Cercare quindi modelli di valutazione più efficaci e una trasparenza assoluta nelle procedure gestionali, e investire sul personale docente, così da migliorare i rapporti numerici tra studenti e docenti (oggi siamo tra i peggiori) e permettere libertà di ricerca e di innovazione.

Mauro Capocci

Il futuro remoto del cosmo e della nostra specie



Solo un miliardo di anni?

di Paolo De Bernardis

Il Mulino, Bologna, 2016, pp. 150 (euro 13,00)

Durante la propria storia, l'uomo si è preoccupato di sapere come andranno a finire le cose. Lo ha fatto pensando alle anime individuali, preoccupandosi di dove andranno dopo la morte del corpo; o per il mondo stesso, in diverse e variopinte interpretazioni dell'apocalisse. Rispetto a religione e filosofia, però, Paolo De Bernardis, astrofisico della «Sapienza» Università di Roma, si ferma un attimo prima, dove cioè le conoscenze scientifiche possono ancora fornire previsioni sensate, lasciando a un silenzio tutto quello che viene dopo.

Il miliardo di anni del titolo è quello che separa l'oggi dalla fase dell'evoluzione del Sole che renderà impossibile la vita sulla Terra. Da qui ad allora c'è tutto il tempo per sviluppare le tecnologie necessarie per un'espansione della vita umana su altri corpi celesti. Dal momento che uno dei fattori fondamentali a rendere inospitale il nostro pianeta sarà l'aumento della temperatura, è lecito immaginare che Marte o Encelado, luna di Saturno, ed Europa, luna di Giove, oggi troppo freddi, rientrino nella fascia di abitabilità.

Diversa la storia per il cosmo nel suo insieme. Là fuori i misteri sono ancora più delle conoscenze: nonostante il progresso scientifico e tecnologico degli ultimi secoli conosciamo solo una frazione molto piccola di tutta la materia che c'è. Che tipo di influenza hanno materia ed energia oscura nelle nostre previsioni sulla fine del cosmo? Qui c'è ancora molto spazio per l'indagine e per ipotesi anche sorprendenti, che non potranno che migliorare all'aumentare della precisione di strumenti e misurazioni. A dispetto del sottotitolo, *Viaggio al termine dell'universo*, che rimanda al pessimismo di Louis Ferdinand Céline, il viaggio di De Bernardis sottolinea quello che di positivo, in termini di conoscenza del mondo, ci ha dato finora la scienza. E lascia intravedere quello che ci darà.

Marco Boscolo

Medicina in festival a Bologna

Il rapporto tra tradizione e innovazione è il filo rosso che lega gli eventi del Festival della scienza medica che si terrà a Bologna dal 20 al 23 aprile. Giunto alla sua terza edizione, l'evento bolognese, organizzato da Fondazione cassa di risparmio Bologna, Genius Bononiae e Università di Bologna, illustrerà la tensione essenziale che attraversa la medicina.

Da una parte c'è la pressione che proviene dalla ricerca di



base e dalla domanda di salute dei cittadini, che innesca dinamiche di mercato, che a loro volta mirano a migliorare tecnologie diagnostiche e terapie senza soluzione di continuità; dall'altra parte, c'è una rivendicazione di valori tradizionali, in particolare sul piano del rapporto tra medico e paziente, che secondo alcuni potrebbero essere messi in pericolo dall'innovazione tecnologica. Numerosi gli ospiti italiani ed esteri che si cimenteranno sull'argomento con approcci ed esperienze diverse, senza rinunciare anche a uno sguardo sul passato della medicina, per capire meglio il presente. Numerosi anche i formati che coinvolgeranno il pubblico di tutte le età, in differenti posti della città. Per tutte le informazioni: <http://bologna-medicina.it>. (cb)



Medicine e bugie

di Salvo Di Grazia

Chiarelettere, Milano, 2017,
pp. 206 (euro 15,00)

Viaggio nel lato oscuro della medicina

Un antidolorifico efficace che però non distruggeva lo stomaco come facevano altri farmaci: il Vioxx sembrava un'ottima alternativa per tante persone affette da dolori cronici, costrette a subire sgradevoli effetti collaterali gastrici. Il successo del farmaco garantì all'azienda produttrice introiti miliardari fino a quando si cominciò a notare un prevalere di infarti e ictus tra chi lo assumeva. Come mai un effetto indesiderato di quella portata non era stato messo in luce nella fase di sperimentazione? In realtà il problema era emerso, ma i dati sui rischi cardiovascolari erano stati occultati dall'azienda, che aveva anteposto il proprio interesse economico alla vita dei pazienti.

Il caso Vioxx è tra i tanti esempi che Salvo Di Grazia, medico, blogger e divulgatore scientifico, propone al suo lettore, lasciandogli l'amara consapevolezza di come le ragioni del mercato e quelle dell'etica procedano su binari paralleli, obbedendo a logiche difficili da conciliare. E capita spesso che sia proprio la logica del profitto a prevalere, in barba ai principi del giuramento di Ippocrate. Il redditizio brevetto di un farmaco sta per scadere, minacciando gli utili di un'azienda? Per aggirare il problema basterà mettere in commercio una molecola quasi identica. Non una vera novità, ma solo un vestito nuovo per un far-

maco attempato. Come raggiungere il mercato più vasto possibile con uno stesso medicinale? È sufficiente proporlo in confezioni diverse, differenziando le indicazioni: blu per il mal di testa, rosa per i dolori mestruali, verde per il mal di denti. Ma se i farmaci sono la risposta al bisogno di essere curati, un'altra efficace strategia è trasformare piccoli fastidi o comuni disturbi in malattie e quindi in un'altra potenziale fonte di redditizie prescrizioni.

Che cosa fare, dunque, per evitare di diventare un ingranaggio di questo perverso macchinario? Rivolgersi al mondo dell'«alternativo»? Come Di Grazia dimostra attingendo a un ampio ventaglio di casi, si tratterebbe di una scelta miope, perché il business dell'alternativo obbedisce sempre alle regole del mercato, ma fa a meno dell'efficacia. L'autore sottolinea, infatti, come la medicina, pur non essendo esente da frodi, si sia dotata di un sistema immunitario in grado di combatterle: quasi impossibile barare senza essere scoperti. E non bisogna dimenticare che i progressi della medicina si sono tradotti in un incremento notevole della durata e della qualità della vita. Pur conservando il giusto senso critico, è bene essere consapevoli di quanto dobbiamo alla scienza medica.

Anna Rita Longo



E l'uomo creò l'uomo

di Anna Meldolesi

Bollati Boringhieri, Torino 2017,
pp. 160 (euro 19,00)

La rivoluzione in corso della CRISPR

«Il nostro studio evidenzia la possibilità di sfruttare il sistema per editare il genoma in modo RNA-programmabile.» Se non siete biologi di formazione, vi dirà poco. Ma questa frase ha aperto le porte di una rivoluzione. La chiusa dell'articolo pubblicato nel 2012 da Emmanuelle Charpentier e Jennifer Doudna sulla tecnica CRISPR di editing genetico, viene paragonata dalla giornalista Anna Meldolesi a quella di Watson e Crick che conclusero con un certo compiaciuto *understatement* il loro celebre articolo del 1953, annunciando la scoperta della struttura a doppia elica del DNA. Questo libro è un ottimo strumento per comprendere la portata della rivoluzione in corso, utile a tutti i lettori che vogliano farsi un'idea di cos'è e come funziona CRISPR (una sorta di analogo a livello genetico della funzione «trova e sostituisci» di Word), anche a quelli dal palato più esigente, considerata la vasta mole di ricerche e possibili applicazioni analizzate dall'autrice.

La precisione di intervento sul DNA, che si potrebbe paragonare a un laser rispetto allo scalpello rappresentato dalle classiche tecniche di ingegneria genetica introdotte dagli anni settanta, ha innescato una frenetica attività nei laboratori di tutto il mondo, alla ricerca di terapie per le malattie genetiche o i tumori, ma mirata anche allo sviluppo di nuovi tipi di alimenti biotech. Meldolesi compie un

lavoro prezioso di ricostruzione del contesto in cui inquadrare i rapidi sviluppi permessi da CRISPR, e fare la tara alle aspettative molto alte che ha già alimentato in campo medico. Ma mette bene in luce le questioni etiche che la nuova tecnica solleva, soprattutto nella prospettiva di applicarla alla linea germinale umana, con modifiche quindi ereditabili dai discendenti. La scoperta e i primi anni di sviluppo delle tecniche CRISPR rappresentano anche un ottimo caso di studio delle dinamiche sociali nella comunità scientifica. È in corso in questi mesi una feroce battaglia legale per i brevetti su CRISPR tra le due ricercatrici già citate, che per prime hanno descritto il funzionamento della tecnica presa in prestito dal mondo dei batteri, e Feng Zhang, che per primo l'ha applicato sulle cellule di mammiferi. Una battaglia consumata non solo per vie legali, ma anche tramite le riviste scientifiche, con controverse ricostruzioni dei meriti e dei ruoli nella scoperta.

Oltre a fornire un vademecum per un lettore curioso di sapere che cosa succede nei laboratori di biologia molecolare, (per aggiornamenti c'è CRISPR MANIA, il blog dell'autrice: <https://crispr.blog>) quest'opera è una lettura fondamentale per ragionare sulle opportunità e le sfide aperte dalla nuova capacità di riscrivere il libro della vita.

Marco Motta

Il futuro è già cominciato

L'innovazione è il tema scelto per la settima edizione della Festa di scienza e di filosofia di Foligno, che mette a confronto discipline diverse

Sosteneva Louis Ferdinand Céline che chi parlava dell'avvenire era un cialtrone, perché quello che conta è l'adesso. Prima di diventare uno degli scrittori più influenti del Novecento, Céline da studente di medicina, ha scritto una tesi sul lavoro pionieristico di Ignác Semmelweis, il medico ungherese scopritore dell'importanza dell'igiene per evitare il propagarsi della febbre puerperale, in anticipo di qualche decennio sulle scoperte di Robert Koch. Sembra strano quindi accanirsi contro chi parla del futuro. Ma forse si può leggere questa sua invettiva contenuta nel *Viaggio al termine della notte* come un monito a guardare quanto di quel futuro si possa già leggere nel presente in cui siamo immersi.

Potrebbe essere questo il punto di partenza della VII edizione della Festa di Scienza e Filosofia di Foligno che quest'anno ha come tema l'innovazione, ma con la precisazione che si parla di «futuro in mezzo a noi». Come a dire che, a saperlo leggere, questo presente ci può già dire qualcosa su come sarà il domani. Lo sa bene chi lavora nella scienza, da sempre motore diretto e indiretto delle trasformazioni, tecnologiche e culturali, che hanno spinto l'umanità verso nuovi orizzonti.

Il tema viene messo su un tavolo transdisciplinare aperto a scienziati e filosofi, a partire dai temi caldi di questi anni: rapporto mente-cervello, editing del DNA, esplorazione spaziale, rapporto tra scienza e democrazia. Tra gli ospiti principali si segnalano il fisico e genetista Edoardo Boncinelli, il filosofo Giulio Giorello, il fisico Roberto Battiston, presidente dell'Agenzia spaziale italiana, l'epistemologo Silvano Tagliagambe e il sociologo Domenico De Masi. Imparare a guardare i segni del futuro che erano già in mezzo a noi nel passato, inoltre, ci può aiutare a capire quali errori potremmo evitare oggi, perché possiamo imparare dalle scelte che abbiamo fatto nei confronti delle innovazioni del passato.

L'edizione 2017 è anche l'occasione per riflettere sull'affissione delle tesi di Martin Lutero, nel cinquecentesimo anniversario di uno degli avvenimenti con le conseguenze a più ampio spettro sulla cultura europea. Come di tradizione, non mancheranno i laboratori per i più piccoli, gli incontri per le scuole - culmine di un percorso lungo tutto l'anno scolastico - e un ragionamento aperto sulle difficoltà della ricerca scientifica fatta dai più giovani.

Marco Boscolo



Da sette anni. L'evento di Foligno dedicato a scienza e filosofia, qui alcuni appuntamenti del passato, è ormai giunto alla sua settima edizione.



Dove & quando:

L'innovazione.

Il futuro in mezzo a noi

Festa di Scienza e Filosofia

Virtù e Canoscenza

dal 27 al 30 aprile

Foligno (sedi varie)

www.festascienzae filosofia.it

Il simbolismo dei Neanderthal

di Marco Peresani

Per gran parte del XX secolo si è pensato che i nostri cugini neanderthaliani non fossero in grado di esprimere comportamenti simbolici paragonabili a quelli dei primi *Homo sapiens*. Ma nuove prove raccolte negli ultimi vent'anni stanno restituendo un'immagine diversa, e molto più complessa, delle capacità cognitive delle popolazioni autoctone del Paleolitico medio in Europa.

Un aiuto per il cervello

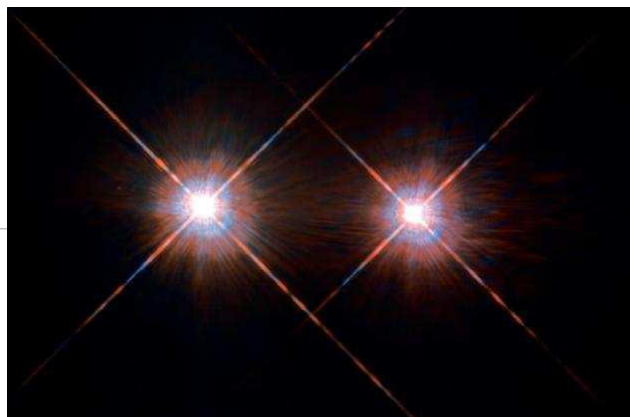
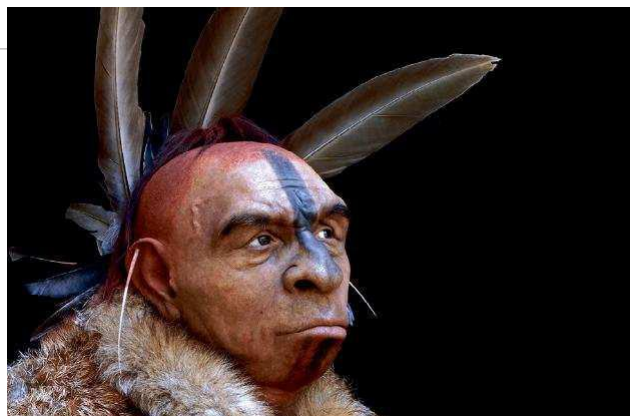
di Kimberly G. Noble

Crescere in uno stato di povertà può portare a differenze significative nelle dimensioni, nella forma e nel funzionamento del cervello infantile, con conseguenze importanti sul percorso scolastico e le opportunità di lavoro. Uno studio sperimentale sta cercando di capire se un sussidio economico ai genitori può prevenire i danni.

Verso Alfa Centauri a tutta velocità

di Ann Finkbeiner

Il miliardario russo Yuri Milner sta finanziando un audace progetto per inviare una sonda verso una delle stelle più vicine. La missione, chiamata Breakthrough Starshot, dovrebbe sfruttare luce laser per sospingere «vele a luce» unite a piccoli chip: un'idea che gli esperti ritengono rischiosa ma al tempo stesso entusiasmante.



LE SCIENZE S.p.A.

Sede legale: Via Cristoforo Colombo 90,
00147 ROMA.

Redazione: tel. 06 49823181
Via Cristoforo Colombo 90, 00147 Roma
e-mail: redazione@lescienze.it
www.le Scienze.it

Direttore responsabile
Marco Cattaneo

Redazione
Claudia Di Giorgio (caporedattore), Giovanna Salvini
(caposervizio grafico), Cinzia Sgheri,
Ale Sordi (grafico), Giovanni Spataro

Collaborazione redazionale
Folco Claudì, Gianbruno Guerrierio
Segreteria di redazione: Lucia Realacci
Progetto grafico: Giovanna Salvini

Referente per la pubblicità
A. Manzoni & C. S.p.A.
agente Daria Orsi (tel. 02 57494475, 345 4415852)
e-mail dorsi@manzoni.it

Pubblicità:
A. Manzoni & C. S.p.A.
Via Nervesa 21, 20139, Milano, telefono: (02) 574941

Stampa
Puntoweb, Via Variante di Cancelliera, snc,
00040 Ariccia (RM).

Consiglio di amministrazione
Corrado Corradi (presidente), Michael Keith Florek
(vice presidente), Gabriele Acquistapace,
Markus Bossle, Stefano Mignanego

Responsabile del trattamento dati
(D. lgs. 30 giugno 2003 n. 196):
Marco Cattaneo

Registrazione del Tribunale di Milano n. 48/70
del 5 febbraio 1970.

Rivista mensile, pubblicata da Le Scienze S.p.A.
Printed in Italy - marzo 2017

Copyright © 2017 by Le Scienze S.p.A.
ISSN 2499-0590

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte della rivista può essere riprodotta, rielaborata o diffusa senza autorizzazione scritta dell'editore. Si collabora alla rivista solo su invito e non si accettano articoli non richiesti.

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in Chief: Mariette DiChristina; Executive editor:
Fred Guterl; Managing Editor: Ricki L. Rusting; Board
of Editors: Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna
Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong,
David Biello, Larry Greenemeier, Ferris Jabr, John
Matson

President Steven Inchcoombe;
Executive vice president: Michael Florek;
Vice president and associate publisher: Michael Voss;
Design Director, Michael Mrak

Hanno collaborato a questo numero
Per le traduzioni: Alessandro Conflitti: *Un problema di massa*; Elisa Dalgo: *Medicina alla cieca*; Daniele Gewurz: *L'universo fa boom*; Lorenzo Lilli: *La parola fischiata*; Michelle Nebiolo: *Lo spazio può attendere*; Alfredo Tutino: *Il paradosso dell'attività fisica*, *Le linee aeree dei microbi*.

Notizie, manoscritti, fotografie, e altri materiali redazionali inviati spontaneamente al giornale non verranno restituiti.

In conformità alle disposizioni contenute nell'articolo 2 comma 2 del «Codice Deontologico relativo al trattamento dei dati personali nell'esercizio dell'attività giornalistica ai sensi dell'Allegato A del Codice in materia di protezione dei dati personali ex d.lgs. 30 giugno 2003 n. 196», Le Scienze S.p.A. rende noto che presso la sede di Via Cristoforo Colombo, 90, 00147, Roma esistono banche dati di uso redazionale. Per completezza, si precisa che l'interessato, ai fini dell'esercizio dei diritti riconosciuti dall'articolo 7 e seguenti del d.lgs. 196/03 - tra cui, a mero titolo esemplificativo, il diritto di ottenere la conferma dell'esistenza di dati, la indicazione delle modalità di trattamento, la rettifica o l'integrazione dei dati, la cancellazione ed il diritto di opporsi in tutto od in parte al relativo utilizzo - potrà accedere alle suddette banche dati rivolgendosi al Responsabile del trattamento dei dati contenuti nell'archivio sopraindicato presso la Redazione di Le Scienze, Via Cristoforo Colombo, 90, 00147 Roma.

ABBONAMENTI E ARRETRATI SOMEDIA S.p.A.

Casella Postale 10055 - 20111 Milano
Abbonamenti: abbonamentiscienze@somedia.it
Arretrati e prodotti opzionali: lescienzevendite@somedia.it
Tel. 199.78.72.78 (0864.256266 per chi chiama da telefoni cellulari. Il costo massimo della telefonata da rete fissa è di 14,37 cent di euro al minuto più 6,24 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa). Per chiamate da rete mobile il costo massimo della chiamata è di 48,4 cent di euro al minuto più 15,62 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa). Fax 02 26681991.
Abbonamenti aziendali e servizio grandi clienti
Tel. 02 83432422; fax 02 70648237;
mail.grandclienti@somedia.it

abb. annuale	Italia	€ 39,00
abb. biennale		€ 75,00
abb. triennale		€ 99,00
copia arretrata		€ 9,00
abb. annuale Europa	Estero	€ 52,00
abb. annuale Resto del Mondo		€ 79,00



Accertamento
diffusione stampa
certificato
n. 8286 del 3/2/2017

LEGGERE, APPROFONDIRE, COLLEZIONARE.

Le Scienze

www.lescienze.it

edizione italiana di Scientific American

ABBONATI SUBITO
CON QUESTA PROPOSTA SUPERVANTAGGIOSA.
PIÙ AUMENTA LA DURATA, PIÙ RISPARMI!



DURATA	PREZZO INTERO	PREZZO PER TE
1 ANNO 12 numeri	€54,00	€39,00
2 ANNI 24 numeri	€108,00	€75,00
3 ANNI 36 numeri	€162,00	€99,00

Solo con l'abbonamento puoi consultare su
www.lescienze.it il ricchissimo archivio dal 1968 ad oggi.

APPROFITTA DI QUESTA OFFERTA SPECIALE!

Spedisci la cartolina che trovi nella rivista oppure trasmettila via fax al n. 02.70.64.82.38
Se preferisci collegati al sito www.ilmioabbonamento.it o telefona al numero 199.78.72.78*

*0864.25.62.66 per chi chiama da telefoni non abilitati o cellulari. Il costo massimo della telefonata da rete fissa è di 14,49 cent di euro al minuto + 6,29 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa). Per chiamate da rete mobile il costo massimo della chiamata è di 48,8 cent di euro al minuto + 15,75 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa).

ART DÉCO

Gli anni ruggenti in Italia

FORLÌ

Musei San Domenico

11 febbraio
18 giugno 2017

**Informazioni
e prenotazioni mostra**
tel. 199 15 11 34

Riservato gruppi e scuole
tel. 0543.36217
artdeco@civita.it
www.mostradecoforli.it

Orario di visita
da martedì a venerdì: 9.30-19.00
sabato, domenica, giorni festivi: 9.30-20.00
lunedì chiuso
17 e 24 aprile e 1 maggio apertura straordinaria
La biglietteria chiude un'ora prima

catalogo
SilvanaEditoriale



Fondazione
Cassa dei Risparmi
di Forlì



in collaborazione
con
Comune di Forlì

